ВОЕННО-МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ
И ВООРУЖЕНИЯ имени А. Н. КРЫЛОВА

В. Т. КАСЬЯНОВ

РАСЧЕТ ЯВНОПОЛЮСНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

ЛЕНИНГРАД
1951

ВОЕННО-МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ВООРУЖЕНИЯ имени А. Н. КРЫЛОВА

В. Т. КАСЬЯНОВ

РАСЧЕТ ЯВНОПОЛЮСНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

ЛЕНИНГРАД
1951 г.

Настоящее пособие к курсовому проектирования явнополюсных синхронных машин написано профессором Ленинградского Электротехнического Института имени В. И. Ульянова (Ленина), доктором технических наук В. Т. Касьяновым.

Пособие имеет целью изложить современную методику расчета явнополюсных синхронных машин и дать студентам и слушателям, выполняющим проект синхронной машины, необходимые обоснования для выбора основных ее размеров и параметров.

Приводимые в пособии расчетные формулы являются в основном формулами, принятыми на отечественных электромашиностроительных заводах, что должно значительно облегчить проектирующим пользование заводскими материалами.

Помимо электрического и теплового расчетов пособие содержит ряд дополнительных сведений по сегментировке стали статора, обмоткам, определению веса и махового момента ротора, расчету динамических реактивностей, выбору и расчету скорости возбуждения и потолка возбудителей, и может поэтому быть использовано также и заводскими инженерами.

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор **Л. Н. Грузов**
канд. техн. наук, доцент **М. И. Алябьев**

Редактор — профессор **А. П. Сахаров**

Список замеченных опечаток

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
7	3 сверху	$2p = \frac{120 \cdot 50}{80 \cdot 2}\ 68$	$2p = \frac{120 \cdot 50}{88{,}2} = 68$
28	8 сверху	по (13)—число	по (13в)—число
78	18 сверху	вымоту	высоту
19	3 снизу	$\eta_2 = \frac{90000 + 0{,}9}{90000 . 0{,}9 + 2414}$	$\eta_2 = \frac{90000 \cdot 0{,}9}{90000 . 0{,}9 + 2414}$
127	5 снизу	$F_0 = \frac{1{,}28}{9{,}81} 0{,}25 \ldots$	$F_0 = \frac{128}{9{,}81} 0{,}25 \ldots$

ОТ АВТОРА

Расчет электрической машины представляет собою задачу, которая может иметь несколько более или менее близких и практически равноценных решений. Он основывается на ряде рекомендуемых соотношений, параметров и размеров, полученных в результате теоретических исследований и изучения построенных и хорошо работающих машин. Конечно, при этом возможны значительные отступления от упомянутых рекомендаций, так как они указывают лишь пределы, которых следует придерживаться при выборе соотношений и величин; однако эти рекомендации способствуют нахождению наилучшего варианта и сокращают необходимое для этого время.

Следует иметь в виду, что даже опытный профессионал-проектировщик нащупывает наилучшее решение и приходит к окончательному рабочему проекту путем последовательной корректировки нескольких эскизных и предварительных вариантов.

При курсовом проектировании, ввиду ограниченного времени, нет возможности просчитывать несколько вариантов в поисках наилучшего решения. Поэтому приходится ограничиться разработкой одного, достаточно удовлетворительного варианта.

В связи с этим, для получения такого варианта и для избежания осложнений и трудностей, могущих значительно увеличить трудоёмкость проекта, при курсовом проектировании следует **принимать умеренные нагрузки активных материалов**, имея в виду, что высокоиспользованная машина может служить объектом только дипломного проекта или специальной работы.

В изложенном ниже пособии по расчёту синхронной машины приведены лишь краткие пояснения к расчётным формулам; подробное же обоснование их студент или слушатель получает на вводных занятиях или находит в указанных далее литературных источниках.

При составлении пособия автор придерживался в основном расчётных формул и обозначений, принятых в [Л. 9]. Обоснование некоторых других расчётных формул, применяемых автором, дано в приложении 2.

Автор выражает благодарность Г. С. Мавромати за ценную помощь при работе над рукописью, а также М. И. Алябьеву, Л. Н. Грузову, А. С. Еремееву, Н. П. Ермолину и А. П. Сахарову, которые просмотрели рукопись и сделали ряд ценных замечаний, учтённых автором при подготовке рукописи к печати.

В. Т. Касьянов

ОБОСНОВАНИЯ И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЯВНОПОЛЮСНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

Задание 1: Генератор (или двигатель)

Мощность на зажимах (кажущаяся) $P_N = 80$ *ква*
Мощность активная $P_a = 64$ *квт*
Напряжение $U_N = 230/400$ *в*
Соединение фаз треугольник/звезда.
Коэффициент мощности $\cos\varphi_N = 0{,}8$
Скорость вращения $n_N = 1000$ *об/м*
Отношение короткого замыкания *(ОКЗ)* $\geqslant 1{,}0$
Кратность угонной скорости $\kappa_y = 1{,}20$
Вентиляция естественная.

Задание 2: Генератор (или двигатель)

Мощность на зажимах (кажущаяся) $P_N = 90.000$ *ква*
Мощность активная $P_a = 81.000$ *квт*
Напряжение $U_N = 13.800$ *в*
Коэффициент мощности $\cos\varphi_N = 0{,}9$
Соединение фаз —звезда
Скорость вращения $n_N = 88{,}2$ *об/мин*
Отношение короткого замыкания *(ОКЗ)* $\geqslant 1{,}5$
Кратность угонной скорости $\kappa_y = 2{,}6$
Маховой момент $GD^2 = 33.000$ *тм*²
Вентиляция—по замкнутому циклу.

З а д а н и е 3: Генератор (с демпферной клеткой).

Мощность на зажимах (кажущаяся) $P_N=550$ *ква*
Мощность активная $P_a=440$ *квт*
Коэффициент мощности $\cos\varphi_N=0,8$
Напряжение $U_N=230/440$ *в*
Соединение фаз треугольник/звезда.
Скорость вращения $n_N=1000$ *об/мин*
Отношение короткого замыкания *(ОКЗ)* > 1.
Кратность угонной скорости $\kappa_y=1,20$
Вентиляция естественная.

§ I. Ток статора и число полюсов

Ток генератора (линейный):

$$I_N=\frac{P_N \cdot 10^3}{\sqrt{3}\, U_N} \text{ (ампер).} \qquad (1)$$

Потребляемая кажущаяся мощность двигателя:

$$P_N=\frac{P_a \text{ (квт)}}{\cos\varphi_N \cdot \eta} \text{ (ква).} \qquad (2)$$

Здесь:

η — коэффициент полезного действия, который можно принять в зависимости от мощности:

$$\eta=(0,87)\div 0,92\div 0,97.$$

Ток двигателя (линейный):

$$I_N=\frac{P_N \cdot 10^3}{\sqrt{3}\, U_N} \text{ (амп).} \qquad (3)$$

Число полюсов (при частоте $f=50$ *герц*):

$$2p=\frac{120 \cdot f}{n_N}=\frac{6000}{n_N}. \qquad (4)$$

П р и м е р 1.

$$I_N=\frac{80.000}{400 \cdot \sqrt{3}}=115\,a.$$

$$2p=\frac{120 \cdot 50}{1000}=6.$$

П р и м е р 2.

$$I_N=\frac{90000\cdot 10^3}{13800\cdot\sqrt{3}}=3770\ a.$$

$$2p=\frac{120\cdot 50}{88{,}2}\approx 68.$$

П р и м е р 3.

$$I_N=\frac{550\cdot 10^3}{400\sqrt{3}}=793\,a.$$

$$2p=\frac{120\cdot 50}{1000}=6.$$

§ 2. Внутренний диаметр и длина статора

Внутренний диаметр D_i и предварительную полную длину статора l_t (включая вентиляционные каналы) можно определить с помощью машинной постоянной C:

$$C=\frac{6\cdot 10^{11}}{\kappa_в f_w\cdot\alpha\cdot AS\cdot B_{\delta N}}=\frac{D_i^2\cdot l_t n_N}{P_э}. \tag{5}$$

Здесь:

D_i и l_t — в *см*;

n_N — скорость вращения в *об/мин*;

$P_э$ — внутренняя (электромагнитная) кажущаяся мощность в *ква*;

$\kappa_в$ — коэффициент формы поля;

f_w — обмоточный коэффициент;

α — полюсное перекрытие;

AS — линейная нагрузка;

$B_{\delta N}$ — наибольшая индукция в воздушном промежутке при номинальной нагрузке.

П р и м е ч а н и е: Для характеристики использования машин с целью их сравнения обычно применяют машинную постоянную в виде:

$$C=\frac{D_i^2\cdot l_t\cdot n_N}{P_N}, \tag{5a}$$

где P_N — кажущаяся мощность в *ква* на зажимах машины.

Некоторые авторы [Л. 1, 2, 8] для целей расчета пользуются машинной постоянной в виде (5а), полагая $U \approx E$, что, однако, вносит погрешность от 6 до 18% (например, в случае синхронных компенсаторов). В результате этого допущения, принятое в расчете значение B_δ относится к холостому ходу с номинальным напряжением, фактическое же значение B_δ при номинальной нагрузке будет больше на 6÷18%. Ввиду этого, для расчетов целесообразнее пользоваться значением C в виде (5), чтобы оперировать реальной величиной $B_{\delta N}$, соответствующей номинальной нагрузке.

Для генераторов и для двигателей, работающих с нормальным перевозбуждением, соответствующим коэффициенту мощности 0,8, можно принять в среднем: $P_э \approx 1{,}08 \cdot P_N$. Кроме того, можно положить: $\kappa_в = 1{,}11$; $f_w \approx 0{,}93$ и $\alpha = 0{,}7$. При этом из (5) получим:

$$C = \frac{9 \cdot 10^{11}}{AS \cdot B_{\delta_N}} = \frac{D_i^2 \cdot l_t \cdot n_N}{P_N}. \quad (5в)$$

Значения C находятся в пределах от $50 \cdot 10^4$ для малых машин, до $17 \cdot 10^4$ для больших машин.

Подставив в (5в) указанные в таблице 1 ориентировочные значения AS и $B_{\delta N}$, найдем для проектируемой машины величину C, с помощью которой можно определить внутренний диаметр статора и его предварительную длину, как описано далее. Окончательная же длина статора устанавливается после расчета обмотки (§ 8).

Важными параметрами синхронной машины являются полюсное деление τ, окружная скорость магнитного поля v (скорость ротора, отнесенная к внутреннему диаметру статора) и отношение длины статора l_t к полюсному делению τ, т. е величина $\xi = \frac{l_t}{\tau}$. Полюсное деление и окружная скорость в общем случае и, в частности, в 50-периодных машинах равны:

$$\tau = \frac{\pi D_i}{2p} = \frac{\pi D_i n_N}{120 \cdot f} = \frac{\pi D_i n_N}{6000} \ (см). \quad (6)$$

$$v = \frac{\pi D_i n_N}{6000} = \frac{\tau \cdot f}{50} \ (м/сек). \quad (6а)$$

Таблица 1

Ориентировочные значения линейной нагрузки AS, тока паза $J_п$ и индукции в воздушном зазоре $B_{\delta N}$ (при нагрузке) для машин различных мощностей x)

P_N	50	100	200	300	450	600	800	1000
AS	300	330	350	365	380	390	410	420
$J_п <$	800			1000		1300		1800
$B_{\delta N}$	От 6000÷6500 до 7600							
P_N	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000	10000
AS	420	440	460	480	490	510	520	530
$J_п <$	1800			2000		2500		3000
$B_{\delta N}$	От 7600 до 8200							
P_N	10000	15000	20000	30000	40000	60000	80000	100000 и более
AS	530	540	550	570	585	600	600	600
$J_п$	3000			3300		3800		4500
$B_{\delta N}$	От 8200 до 8500							

Как видим из (6) и (6а), при $f=50$ *герц*, окружная скорость v в *м/сек.* численно равна полюсному делению τ в *см*.

Верхний предел номинальной окружной скорости для явнополюсных машин:

$$v < (75 \div 90) \text{ м/сек.} \tag{6в}$$

Отношение ξ, вообще, имеет широкие пределы, а именно:

$$\xi = \frac{l_t}{\tau} = (0{,}6 \text{ до } 6). \tag{6с}$$

Однако оптимальное (экономически наиболее целесообразное) значение $\xi_{опт}$ находится в пределах [Л. 2, 8]:

---

x) С целью получения пониженных реактивностей, задаваемых для генераторов, работающих на длинные линии передач, указанные в таблице значения AS и $J_п$ приходится понижать на 20÷25% при соответствующем увеличении размеров и веса машины.

$$\xi_{опт}=\frac{l_{опт}}{\tau}=(1{,}3\div1{,}6). \qquad (6d)$$

Задавшись определенным (например, оптимальным) отношением ξ и исключив из (5в) длину статора l_t, с помощью (6с) и (6) находим диаметр статора D_i:

$$D_i=\sqrt[3]{\frac{1900\cdot C\cdot P_N}{\xi\cdot n_N^2}}\ (см). \qquad (7)$$

Определив по (7) диаметр D_i, или выбрав его на основании каких-либо других (изложенных далее) соображений, найдем из (5в) длину статора:

$$l_t=\frac{C\cdot P_N}{D_i^2\cdot n_N}\ (см). \qquad (7а)$$

Рассмотрим особенности выбора значений D_i и l_t для отдельных типов машин.

А. Нормальные явнополюсные 50-периодные машины с угонной скоростью $n_y=n_N+20\%$

К этой категории машин относятся генераторы и двигатели малых, средних и больших мощностей, синхронные компенсаторы, дизель-генераторы, тихоходные двигатели и другие.

Для определения основных размеров D_i и l_t находим с помощью (5в) и таблицы 1 машинную постоянную C и задаемся оптимальным значением ξ по (6d) х). Подставив эти значения C и ξ в (7), получаем внутренний диаметр статора и округляем его до удобного или стандартного (серийного) размера, после чего с помощью (7а) находим длину статора. Далее по (6) вычисляем значение τ и v и по (6с) и (6d) проверяем величину ξ.

Если при этом окажется, что $\tau>75$ *см*, т. е. что $v>75$ *м/сек.* (это случается при расчете синхронных компенсаторов), то нужно задаться приемлемой величиной v (в пределах 60–75 *м/сек.*), найти с помощью (6) или (6а) другую, меньшую, величину D_i, определить l_t по (7а) и

х) В машинах с $P_N \leq 100$—200 *ква* для улучшения условий естественной вентиляции и возможности размещения обмотки возбуждения следует выбирать ξ в пределах 0,6—0,8.

проверить отношение ξ по (6с). В случае, если $\tau < 13$ *см*, нужно задаться приемлемой величиной τ_{min} (полагая для генераторов без демпферной клетки $\tau_{min} = (13 \div 15)$ *см* x) и для генераторов и двигателей с пусковой клеткой — $\tau_{min} = (15 \div 17)$ *см*), затем найти с помощью (6) и (6а) другой, увеличенный, диаметр D_i, определить l_t по (7а) и проверить отношение ξ по (6с).

Б. Гидрогенераторы

При расчете гидрогенераторов решающее влияние на выбор диаметра статора оказывают заданная угонная скорость вращения n_y и заданный маховой момент ротора GD^2.

Угонная скорость вращения n_y, предписываемая техническим заданием, может превышать нормальное число оборотов n_N в κ_y раз, причем:

$$\kappa_y = \frac{n_y}{n_N} = (1{,}7 \div 3) \qquad (8)$$

в зависимости от типа турбины.

Задаваемые техническими условиями маховые моменты гидрогенераторов обычно находятся вблизи значений, определяемых по следующим формулам: xx)

$$\left.\begin{aligned} \text{при } n_N \leqslant 300 \text{ об/мин.} \rightarrow GD^2 \approx (3800 - 6n_N)\frac{P_N \cdot \cos\varphi_N}{n^2_N} \ (\text{т.м}^2) \\ \text{при } n_N > 300 \text{ об/мин.} \rightarrow GD^2 \approx 1850 \frac{P_N \cdot \cos\varphi_N}{n^2_N} \ (\text{т.м}^2) \end{aligned}\right\} \qquad (8а)$$

Осуществление заданного махового момента ротора при экономически целесообразной затрате металла на его обод требует наибольшего возможного диаметра статора, который ограничивается предельной угонной окружной скоростью $v_{y\,max}$. С помощью (6) и (6а) находим связь между внутренним диаметром статора 50-периодной машины и угонной окружной скоростью v_y:

$$D_i = \frac{v_y \cdot 6000}{\pi \cdot n_N \cdot \kappa_y} \qquad (8в)$$

---

x) В явнополюсных генераторах повышенной частоты приходится мириться с полюсными делениями порядка 8—9 *см*.

xx) В больших гидрогенераторах, работающих на длинные линии передач, маховые моменты могут в $1{,}5 \div 1{,}8$ раза превосходить значения, получаемые по (8а).

Принимая предельную угонную окружную скорость явнополюсного ротора (отнесенную к внутреннему диаметру статора) $v_{y\,max}=115$ *м/сек.*, получим из (8в) наибольший допустимый внутренний диаметр статора:

$$D_{i\,max}=\frac{v_{ymax}\cdot 6000}{\pi\cdot n_N\cdot \kappa_y}=\frac{22\cdot 10^4}{n_N\cdot \kappa_y}\ (см). \qquad (8c)$$

Этому диаметру соответствует полюсное деление:

$$\tau_{max}=\frac{v_{y\,max}\cdot 50}{f\cdot \kappa_y}=\frac{115}{\kappa_y}(см). \qquad (8d)$$

Примечание: Если принять в среднем: $AS=560$ и $B_{\delta N}=8000$ и выразить D_i и l_t в метрах, то из (5в) найдем выражение для номинальной мощности гидрогенератора:

$$P_N\approx 5D_i^2 l_t n_N ква. \qquad (A)$$

Исключив из (A) диаметр D_i, с помощью (8c) получим выражение для предельной мощности гидрогенератора:

$$P_{Nmax}\approx 5\left(\frac{60}{\pi}\right)^2 \frac{v^2_{ymax}\cdot l_t}{n_N\cdot \kappa^2_y}\ ква. \qquad (B)$$

Для шихтованных роторов, изготовленных из листовой стали повышенного качества, можно допустить $v_{ymax}=135$ *м/сек.* [Л. 15]; при этом, приняв $l_{tmax}=4$ *метра*, получаем из (B):

$$P_{Nmax}\approx \frac{1{,}33\cdot 10^8}{n_N\cdot \kappa^2_y}\ ква. \qquad (C)$$

Для роторов, изготовленных из цельных дисков (что возможно при $D_{imax}=4{,}8$ *метра*), можно допустить $v_{ymax}=160$ *м/сек.* [Л. 15]; при этом, приняв $l_{tmax}=4$ *метра*, получаем из (B):

$$P_{Nmax}\approx \frac{1{,}86\cdot 10^8}{n_N\cdot \kappa^2_y}\ ква. \qquad (D)$$

Маховой момент и вес шихтованного ротора (включая спицы и втулку, но без вала и турбины) можно определить до разработки его конструкции по приближенным формулам с точностью $\pm 10\%$ [см. приложение 2]:

$$\left.\begin{aligned} GD^2 &\approx 19(D_i - h'_m)^3 h'_m \cdot l_t + 27(D_i - 2h'_m - b_o)^3 b_o l_o \quad (\text{тм}^2) \\ G &\approx 19(D_i - h'_m) h'_m l_t + 27(D_i - 2h'_m - b_o) b_o l_o \quad (\text{т.}) \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

Для предварительных расчетов А. С. Еремеев рекомендует следующую формулу:

$$GD^2 \approx 3 l_t [D_i^4 - (D_i - 2h'_m - 2b_o)^4] \ \text{т.м}^2. \qquad (9А)$$

В (9) и (9а) обозначают:

D_i и l_t — диаметр и длина статора в *метрах*.
h'_m — полная высота полюса в *метрах* (включая полюсный наконечник).
b_o и l_o — радиальная ширина обода ротора и его осевая длина в *метрах* (включая вентиляционные каналы).

При нормальной конструкции шихтованного ротора для предварительных расчетов можно в среднем принять:

$$\left.\begin{aligned} h'_m &= 0{,}3 \ \text{метра} \\ b_o &= 0{,}6 \ \text{метра при } v_y = 115 \ \text{м/сек.} \\ b_o &= 0{,}52 \ \text{"} \quad \text{"} \ v_y = 100 \ \text{"} \\ b_o &= 0{,}45 \ \text{"} \quad \text{"} \ v_y = 80 \ \text{"} \end{aligned}\right\} \quad (9а)$$

Из предыдущего вытекает следующий порядок выбора диаметра и длины статора гидрогенератора.

Исходя из задания и учитывая (8а), определяем по (8с) наибольший возможный диаметр статора D_{imax} и округляем его до удобного размера; затем с помощью (7а) и таблицы I находим длину статора l_t. Далее вычисляем маховой момент и вес ротора по (9), приняв $l_o = l_t$ и $b_o = 0{,}6$ *метра*.

Если найденный маховой момент окажется менее требуемого (что случается при большой кратности угонного числа оборотов k_y), то его можно увеличить за счет удлинения обода ротора до величины $l_o = l_t + (0{,}2 \div 0{,}6)$ *метра*.

Если же маховой момент при $l_o = l_t$ окажется больше требуемого, то с помощью (8в) и (7а) находим размеры статора D_i и l_t для угонных скоростей 100 и 80 *м/сек.*, вычисляем соответствующие маховые моменты и веса по (9), полагая

$l_0 = l_t$ и принимая b_0 по (9а); полученные результаты вписываем в таблицу вариантов.

С помощью этой таблицы, путем интерполяции, нетрудно подобрать такой наименьший диаметр статора, при котором маховой момент будет иметь требуемую величину. Во многих случаях, с целью уменьшения веса верхней крестовины (пропорционального ~ кубу диаметра) найденный наименьший диаметр статора уменьшают еще на 10—15%; при этом для получения заданного махового момента приходится увеличивать длину обода до $l_0 = l_t + (0{,}2 \div 0{,}5)$ *метра* (а иногда увеличивать и ширину обода b_0), идя на соответствующее утяжеление ротора.

Установив таким образом окончательный диаметр статора и его длину, находим и проверяем с помощью (6а), (6в) и (6с) окружную скорость, полюсное деление и отношение ξ. Требуемая величина махового момента корректируется и осуществляется при разработке конструкции гидрогенератора.

Пример 1. Задаёмся предварительными величинами индукции в воздушном зазоре $B_{\delta N}$ и линейной нагрузкой AS по таблице 1:

Примем $B_{\delta N} = 6500.$

$AS = 320.$

Тогда

$$C = \frac{9 \cdot 10^{11}}{6500 \cdot 320} = 43{,}2 \cdot 10^4.$$

В соответствии с примечанием в разделе А, примем:

$$\xi = \frac{l_t}{\tau} = 0{,}7.$$

Тогда:

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{1900 \cdot C \cdot P_N}{\xi \cdot n^2_N}} = \sqrt[3]{\frac{1900 \cdot 43{,}2 \cdot 10^4 \cdot 80}{0{,}7 \cdot 1000^2}} =$$

$$= 45{,}4\ см \approx 45\ см.$$

$$l_t = \frac{CP_N}{D_i^2 \cdot n_N} = \frac{43{,}2 \cdot 10^4 \cdot 80}{45^2 \cdot 1000} = 17{,}1\ см \approx 17\ см.$$

Итак, принимаем:

$$D_i=45\ см;\ l_t=17\ см.$$

При этом по (6) и (6а) находим:

$$\tau=\frac{\pi\cdot 45}{6}=23,6\ см.$$

$$v=23,6\ м/сек.$$

$$\xi=\frac{l_t}{\tau}=\frac{17}{23,6}=0,72.$$

Пример 2. Приняв $v_{ymax}=115$ *м/сек.*, находим по (8с):

$$D_{imax}=\frac{22\cdot 10^4}{88,2\cdot 2,6}=958\approx 960\ см.$$

По таблице 1 принимаем $AS\cong 600$ и $B_{\delta N}=8200$ и с помощью (5в) и (7а) получаем:

$$C=\frac{9\cdot 10^{11}}{600\cdot 8200}=18,3\cdot 10^4.$$

$$l_t=\frac{18,3\cdot 10^4\cdot 90000}{960^2\cdot 88,2}=203\approx 200\ см.$$

По (8а) и (9) находим:

1) $GD^2=(3800-6\cdot 88,2)\cdot\dfrac{90000\cdot 0,9}{88,2^2}=34.000\ т.м.^2$

(задано — 33.000).

2) $GD^2=19(9,6-0,3)^3\cdot 0,3\cdot 2+27(9,6-0,6-0,6)^3 0,6\cdot 2=$
$=28300\ т.м.^2$

Как видим, для увеличения махового момента необходимо увеличить длину обода. Приняв $l_o=2+0,5=2,5$ *м*, получаем:

$$GD^2\approx 19(9,6-0,3)^3 0,3\cdot 2+27(9,6-0,6-06)^3\cdot 0,6\cdot 2,5=$$
$$=33200\ т.\ м.^2$$

При этом вес ротора по (9):

$$G\approx 19(9,6-0,3)\,.\,0,3\cdot 2+27(9,6-0,6-0,6)0,6\cdot 2,5=446\ т.$$

Итак, принимаем:

$$D_i=960;\ l_t=200;\ b_o=60 \text{ и } l_o=250 \text{ см}.$$

При этом по (6), (6а), (6в) и (6с) находим:

$$\tau=\frac{\pi \cdot 960}{68}=44,4 \text{ см}.$$

$$v=44,4 \text{ м/сек}.$$

$$\xi=\frac{l_t}{\tau}=\frac{200}{44,4}=4,5.$$

Для примера посмотрим, как изменятся основные размеры гидрогенератора, если допустить угонную окружную скорость $v_{vmax}=125$ *м/сек*, предполагая, что обод ротора будет изготовлен из листовой стали с повышенными механическими свойствами.

Из (8в), (7а), (8d) и (6с) находим:

$$D_{imax}=\frac{125 \cdot 6000}{\pi \cdot 88,2 \cdot 2,6}=1040 \text{ см}.$$

$$l_t=\frac{18,3 \cdot 10^4 \cdot 90000}{1040^2 \cdot 88,2}=173 \text{ см}.$$

$$\tau=48;\ \xi=\frac{173}{48}=3,6.$$

По (9) получаем, полагая $b_o=0,6$ и $l_o=l_t=1,73$:

$$GD^2=19(10,4-0,3)^3 \cdot 0,3 \cdot 1,73+27(10,4-0,6-0,6)^3 0,6 \cdot 1,73= =32200 \text{ т.м}^2.$$

$$G=19(10,4-0,3) \cdot 0,3 \cdot 1,73+27(10,4-0,6-0,6) \cdot 0,6 \cdot 1,73= =358 \text{ т}.$$

Как видим, для получения требуемого махового момента 33 000 *т.м.*^{2} придется лишь незначительно удлинить обод ротора, причем вес ротора будет меньше, чем в прежнем варианте.

Пример 3. По таблице I выбираем предварительные значения электромагнитных нагрузок:

$$B_{\delta N}=7200 \text{ и } AS=380.$$

При этом по (5в) получаем:

$$C=\frac{9\cdot10^{11}}{7200\cdot380}=33\cdot10^{4}.$$

В соответствии с (6d) принимаем: $\xi=1,4$. Тогда по (7) и (7a) находим:

$$D_i=\sqrt[3]{\frac{1900\cdot33\cdot10^{4}\cdot550}{1,4\cdot1000^{2}}}\approx62,5\ \textit{см};$$

$$l_t=\frac{33\cdot10^{4}\cdot550}{62,5^{2}\cdot1000}=46,3\approx46,5\ \textit{см}.$$

По (6), (6a), (6в) и (6c) находим:

$$\tau=\frac{\pi\cdot62,5}{6}=32,7\ \textit{см};$$

$$v=32,7\ \frac{50}{50}=32,7\ \textit{м/сек};$$

$$\xi=\frac{46,5}{32,7}=1,42.$$

§ 3. Выбор типа обмотки и числа пазов статора

Нормальные линейные напряжения для машин трехфазного тока даны в таблице 2.

Таблица 2

Нормальные линейные напряжения машин трехфазного тока

Генераторы	230/400	(525)	3150	6300	10500	13800	15750	(18000)
Двигатели	220/380	(500)	3000	6000	10000	(13000)	—	—

В настоящее время для статоров явнополюсных синхронных машин трехфазного тока почти исключительно применяются два типа обмоток [Л. 10, 11, 12, 13]:

а) двухслойные катушечные петлевые обмотки с несколькими или многими активными проводниками в пазу (рис. 3).

в) двухслойные (и однослойные) стержневые волновые обмотки с двумя (одним) активными проводниками в пазу, имеющими поперечное сечение до 1000 *мм*^{2} (и более) и несущими токи до 2000÷2500 *а* (4500) (рис. 4).

Двухслойные катушечные обмотки с несколькими и многими проводниками в пазу (рис. 3) пригодны для всех напряжений. Для изготовления их наиболее желательны, по технологическим требованиям, изолированные проводники прямоугольного профиля с поперечным сечением 12÷15 *мм*^{2} (рис. 3в). Если же по расчёту требуется проводник с большим поперечным сечением, то он составляется из двух (рис. 3с и е), трех (рис. 3d), а в случае надобности и из четырех (рис 3а) элементарных проводников, соединенных параллельно. Таким образом, активный проводник катушечной обмотки, наиболее желательный с технологической точки зрения, должен иметь поперечное сечение от 12 до 45 (60) *мм*^{2} и нести ток I_a от 40 до 150 (200) *а*. Поэтому в машинах с большими токами катушечную обмотку приходится делать с двумя, тремя и более параллельными ветвями.

Разумеется, что в машинах небольшой мощности ток и поперечное сечение проводника могут быть значительно меньше указанных выше, технологически удобных, значений; при этом, если требуемое сечение проводника меньше 5÷6 *мм*^{2}, то удобнее применять круглый проводник (только при $U_N < 3000$ *в*).

Наоборот, в крупных машинах иногда приходится увеличивать поперечное сечение активного проводника катушечной обмотки до 250÷350 и более *мм*^{2}, при токах до 800 и более *ампер*. Но в таких крайне нежелательных случаях активный проводник, составленный для уменьшения потерь от вихревых токов из многих параллельно соединенных элементарных проводников с сечением 10÷12 *мм*^{2}, необходимо перекручивать (транспонировать) в головке катушки или в междукатушечных соединениях для устранения паразитных циркуляционных токов [Л. 1, 5, 10], что сильно осложняет и удорожает изготовление обмотки.

Катушечные обмотки всегда выполняются с сокращенным шагом (около 0,8 полюсного деления), что приводит к значительной экономии меди и улучшает электромагнитные свойства обмотки *).

---

*) Иногда применяются двухслойные катушечные обмотки с нечетным числом активных проводников в пазу (два сорта катушек с различными числами витков).

Недостатком катушечной петлевой обмотки являются многочисленные междукатушечные и междугрупповые соединения (перемычки), общая длина которых превышает три окружности статора, что при больших поперечных сечениях активного проводника и при малом числе активных проводников в пазу обусловливает большой добавочный расход меди, усложняет производство и понижает надежность машины. В больших высоковольтных машинах очень важным недостатком катушечной обмотки является наличие витковой изоляции, которая при различных перенапряжениях, блуждающих волнах и проч., может привести к серьезным авариям. По этим соображениям в больших высоковольтных машинах следует применять стержневые волновые обмотки, имеющие весьма надежную витковую изоляцию.

Стержневые обмотки с двумя активными проводниками в пазу (рис. 4) особенно целесообразно применять в машинах с фазным током $I_ф > (900 \div 1000)$ *а* при напряжениях $U_N > 6000$ *в*. Стержни (активные проводники) этих обмоток могут иметь поперечное сечение до 1000 *мм*² при токе в стержне до $2000 \div 2500$ *а*.

С целью уменьшения потерь от вихревых токов стержни составляются из многих параллельно соединенных элементарных изолированных проводников с сечением $10 \div 15$ *мм*², переплетенных (транспонированных) между собою для избежания паразитных циркуляционных токов (рис. 4а). Вследствие этого стержневые обмотки дороже катушечных. Однако они весьма надежны в работе, так как в них витковая изоляция равна удвоенной корпусной (пазовой) изоляции.*) Сокращение шага в волновых стержневых обмотках не дает экономии меди и служит лишь для улучшения их электромагнитных свойств. С точки зрения расхода меди на внутренние соединения (перемычки) стержневые волновые обмотки, как правило, выгоднее катушечных обмоток [Л. 12, 13].

Иногда в машинах с большими токами применяются однослойные стержневые обмотки (один стержень в пазу) [Л. 12, 13], дающие при высоких напряжениях значительную экономию изоляционного материала, а при больших полюсных делениях — также и заметную экономию меди лобовых соединений, но производство их сложнее по сравнению с нормальными двухслойными обмотками [Л. 12, 13].

*) Недостатком их является большое количество массивных паек, несущих большие токи и требующих тщательного выполнения.

Особую разновидность двухслойных обмоток представляют собою „полутораслойные“ обмотки (рис. 4в) [Л. 12, 13], у которых число проводников в пазу $s_п=1^1/_2$. В них стержни половинного сечения образуют обмотку с двумя параллельными ветвями, которая соединяется последовательно с обмоткой, составленной из стержней полного сечения. Технологически такие обмотки сложнее нормальных двухслойных, но в ряде случаев они оказываются весьма целесообразными, так как дают возможность получить наиболее желательные значения $J_п$, AS, q и t_1, а также использовать имеющиеся штампы и разработанные конструкции, при очень надежной витковой изоляции, свойственной двухслойным стержневым обмоткам.

Стержневые волновые обмотки с $s_п=2$ и $s_п=1^1/_2$ следует применять в случаях, когда одновременно имеем:

$$\left.\begin{array}{l} I_ф \geqslant (900 \div 1000)_а \\ U \geqslant 6000\ в \end{array}\right\}. \qquad (10)$$

Во всех остальных случаях оказывается более целесообразной двухслойная катушечная обмотка с многовитковыми секциями (т.е. с несколькими активными проводниками в пазу), и с несколькими (а иногда и с многими) параллельными ветвями. В малополюсных, т. е. в быстроходных, машинах с большими токами катушечная петлевая обмотка, даже при наибольшем возможном числе параллельных ветвей, часто приводит к большим сечениям активных проводников, требующим сложной перекрутки (транспозиции) элементарных проводников; в таких случаях стержневая волновая обмотка с несколькими параллельными ветвями становится целесообразной и при значительных отступлениях от условий (10), т. е. при $I_ф<900$ *а* и $U_N<6000$ *в*.

Приступая к выбору типа обмотки и количества пазов статора, имеем следующие исходные данные, полученные и заданные в §§ 1 и 2:

Линейное напряжение	U_N
Фазный ток	$I_ф$
Диаметр статора	D_i
Число полюсов	$2p$
Линейная нагрузка	AS

Тип обмотки определяем с помощью (10) и относящихся к нему замечаний.

Далее находим a — число параллельных ветвей обмотки.

Для двухслойной и „полутораслойной“ стержневых волновых обмоток с $s_п = 2$ и $s_п = 1^1/_2$ имеем:

$$a = \frac{S_п \cdot I_ф}{J_п} = \frac{(2 \div 1{,}5) I_ф}{J_п} . \qquad (10a)$$

Здесь $J_п$ — по таблице 1. Полученные из (10а) два значения a округляем или до промежуточного целого числа, или до ближайших целых чисел, и принимаем то из них, которое потребовало меньшего округления. Таким образом устанавливаем значения a и $s_п$ и получаем окончательные величины тока паза $J_п$ и тока в проводнике I_a:

$$I_a = \frac{I_ф}{a} \qquad (10в)$$

$$J_п = \frac{I_ф}{a} s_п . \qquad (10c)$$

Для катушечной петлевой двухслойной обмотки число параллельных ветвей a должно быть равно:

$$a = \frac{I_ф}{I_a} \geqslant \frac{I_ф}{40 \div 100 \div (200)} . \qquad (11)$$

Полученные из (11) три значения a округляем до ближайших возможных целых чисел.

Далее определяем предварительное число пазов статора Z, которое для всех типов обмоток равно:

$$Z \approx \frac{\pi D_i AS}{J_п} \qquad (12)$$

или

$$Z \approx \frac{a \pi D_i AS}{s_п I_ф} . \qquad (12a)$$

В (12а) значение $J_п$ для стержневой волновой обмотки берется из (10с), а для катушечной — по таблице 1. Значение же AS было выбрано в § 2.

Окончательное число пазов Z устанавливается путем подбора таким образом, чтобы были удовлетворены указанные далее условия (требования) (А), (В) и (С). При этом окончательное значение Z по возможности не должно отличаться от вычисленного по (12) более, чем на $\pm 5\%$.

А. Условия симметрии обмотки

$$\frac{Z}{3t} = \text{целое число}. \qquad (13)$$

Здесь t — общий наибольший делитель чисел Z и p.

При этом наибольшее возможное число параллельных ветвей обмотки a_{max} равно:

$$\left.\begin{aligned} a_{max} &= t, \text{ если } \frac{Z}{3t} \text{ число нечетное} \\ \text{и } a_{max} &= 2t, \text{ если } \frac{Z}{3t} \text{ число четное} \end{aligned}\right\}. \qquad (13a)$$

Очевидно, что a_{max} должно быть равно или кратно значению a, полученному из (10а) для волновой обмотки, или значению a, полученному из (11) для петлевой обмотки. В последнем случае, зная пределы a, полученные из (11), учитывая (13а) и имея в виду, что:

$$s_n = a\,\frac{J_n}{I_ф}, \qquad (13в)$$

подбираем значение s_n и a так, чтобы удовлетворялось соотношение (12а).

Полутораслойная обмотка (с $s_n = 1^1/_2$) по существу является комбинацией двух однослойных обмоток, в каждой по $Z^1 = \frac{Z}{2}$ катушек (секций). При этом, если „большая" обмотка имеет a параллельных ветвей, то „малая" обмотка должна иметь $2a$ параллельных ветвей [Л. 12, 13]. Таким образом, условия выполнимости и симметрии полутораслойной обмотки с a параллельными ветвями будут следующие:

$$\left.\begin{aligned} Z^1 = \frac{Z}{2} &= \text{целое число} \\ \frac{Z^1}{3t} &= \text{целое число} \end{aligned}\right\}, \qquad (13c)$$

где t—общий наибольший делитель чисел p и $Z^1\left(=\frac{Z}{2}\right)$.

При этом:

$$\left.\begin{array}{l} a_{max}=2t, \text{ если } \dfrac{Z^1}{t} \text{ число чётное} \\ \text{и } a_{max}=t, \text{ если } \dfrac{Z^1}{t} \text{ число нечётное} \end{array}\right\}. \qquad (13d)$$

Само собой разумеется, что a_{max} должно быть равно или кратно $2a$.

В. Условие дробности q

Число пазов на полюс и фазу q выражается следующим образом:

$$q=\frac{Z}{6p}=b+\frac{c}{d}=\frac{bd+c}{d}. \qquad (14)$$

Здесь: b — целое число и $\frac{c}{d}$ — правильная несократимая дробь.

В больших многополюсных генераторах q должно быть дробным и при том больше $1^1/_2$, т.е,

$$q=\frac{Z}{6p}\geqslant 1\frac{1}{2}. \qquad (14a)$$

В генераторах малой и средней мощности дробность q необязательна, а при $2p\leqslant 8$ к тому же и трудно осуществима.

Для двигателя дробность q также необязательна, а при $\frac{bd}{c}<5$ — даже нежелательна.

Примечание: Для уменьшения магнитных шумов и с целью получения наилучшей формы кривой э. д. с. желательно (но не обязательно) придерживаться следующих рекомендаций [Л. 9]:

а) по возможности избегать значений q, удовлетворяющих равенству:

$$3q=\kappa\pm\frac{1}{d} \qquad (14в)$$

(где κ — целое число);

в) по возможности принимать значения q, удовлетворяющие равенствам:

$$\left.\begin{aligned} 3q&=k\pm\frac{d-1}{2d}\text{при } d \text{ нечётном} \\ 3q&=k\pm\frac{d-2}{2d}\text{при } d \text{ чётном} \end{aligned}\right\}. \qquad (14c)$$

Заметим, что в симметричной обмотке число d в (14) не может быть кратным 3, а отношение $\frac{2p}{ad}$ всегда равно целому числу. Кроме того, наибольшее число параллельных ветвей

$$a_{\max}=\frac{2p}{d}.$$

С. Условие удобной сегментировки сердечника статора и упрощения схемы обмотки

Число пазов Z должно разлагаться на возможно большее количество простых множителей (2, 3, 5). Простые множители 17, 19, 23... нежелательны, так как осложняют сегментировку и условия разъёма статора.

Подобрав значение Z, удовлетворяющее указанным выше требованиям А, В и С, выписываем окончательные параметры обмотки:

$$\left.\begin{aligned} &Z,\ a,\ s_n,\ J_n=s_n\frac{I_\phi}{a}; \\ &q=\frac{Z}{6p}=b+\frac{c}{d};\ AS=\frac{ZJ_n}{\pi D_i}=\frac{Zs_nI_\phi}{a\pi D_i} \\ &t_1=\frac{\pi D_i}{Z}=\frac{J_n}{AS}\ (см) \end{aligned}\right\}. \qquad (15)$$

Пазовое деление (шаг зубца) t_1 должно находиться в пределах от $2{,}5\div3$ *см* для машин малой мощности; до $5\div7{,}5$ *см* для крупных машин. Это требование автоматически выдерживается, если значение J_n соответствует таблице 1.

Заметим, что при стержневых волновых обмотках в отдельных случаях выбранное число пазов Z может оказаться неудобным для выполнения схемы. Вопросы составления схем обмоток изложены в [Л. 3, 4, 5, 10, 12, 13].

Пример 1. Имеем следующие данные для выбора типа и параметров обмотки статора:

Линейное напряжение	$U_N = 400$ *в*
Фазный ток	$I_ф = 115$ *а*
Диаметр статора	$D_i = 45$ *см*
Число полюсов	$2p = 6$
Линейная нагрузка	$AS \cong 320$

По (10) находим, что следует применить двухслойную катушечную обмотку.

Для катушечной петлевой двухслойной обмотки число параллельных ветвей a должно быть равно, согласно (11):

$$a = \frac{I_ф}{I_a} \geqslant \frac{I_ф}{40 \div 100 \div (200)} = \frac{115}{40 \div 100 \div (200)} =$$

$$= 2,87 \div 1,15 \div (0,58).$$

Примем $a = 2$.

По таблице 1 выбираем: $J_n \approx 700$.

Предварительное число пазов находим по (12)

$$Z = \frac{\pi \, . \, 45 \, . \, 320}{700} \approx 65.$$

Полученное число пазов не удовлетворяет обязательным требованиям А, В и С. Поэтому после нескольких пробных подсчётов принимаем:

$$Z = 54; \; a = 2; \; s_n = 2 \times 7 = 14 \; ?$$

и, в соответствии с (15), получаем следующие окончательные параметры обмотки:

$$Z = 54; \; a = 2; \; s_n = 2 \times 7 = 14; \; q = 3.$$

$$J_n = \frac{115 \, . \, 14}{2} \approx 807.$$

$$AS = \frac{54 \, . \, 14 \, . \, 115}{2 \, . \, \pi \, . \, 45} = 308.$$

$$t_1=\frac{\pi.45}{54}=2,62\ см.$$

Пример 2. Имеем следующие данные для выбора типа и параметров обмотки статора:

Линейное напряжение	$U_N=13800$ *в*
Фазный ток	$I_ф=3770$ *а*
Диаметр статора	$D_i=960$ *см*
Число полюсов	$2p=68$
Линейная нагрузка	$AS=600$

По (10) находим, что следует применить стержневую волновую обмотку:

По таблице 1 выбираем: $J_п<4400$ и из (10а) получаем:

$$a=\frac{s_п I_ф}{J_п}=\frac{(2\div 1,5)\,.\,3770}{4400}=2,33\div 1,75=2.$$

Итак, принимаем стержневую волновую обмотку с двумя проводниками в пазу и с двумя параллельными ветвями. По (10в) и (10с) находим ток в параллельной ветви и ток паза

$$I_a=\frac{3770}{2}=1885\ а.$$

$$J_п=\frac{3770}{2}\,.\,2=3770\ а.$$

Предварительное число пазов статора находим по (12):

$$Z\approx\frac{\pi\,.\,960\,.\,600}{3770}=480.$$

Случайно мы получили, не прибегая к округлению, вполне подходящее число пазов, удовлетворяющее всем обязательным требованиям А, В и С. Действительно, по (13) и (13а) находим для $Z=480$ и $p=34$:

$$t=2;\ \frac{Z}{3t}=\frac{480}{3\,.\,2}=80-$$

целое и чётное число и $a_{max}=2t=4$.

Следовательно, требуемые две параллельные ветви и подавно возможны.

По (14) и (14а) получаем:

$$q=\frac{480}{6\,.\,34}=2\frac{6}{17}>1\frac{1}{2}.$$

Разложение числа Z на простые множители даёт также хороший результат:

480	240	120	60	30	15	5	1
2	2	2	2	2	3	5	1

Полный шаг y_k и число ходов обмотки m [Л. 12, 13] обещают удобоисполнимую схему

$$y_k=\frac{Z\pm m}{p}=\frac{480-4}{34}=14.$$

Итак, по (15) имеем окончательно:

$$Z=480;\ a=2;\ s_п=2;\ J_п=3770;\ q=2^6/_{17}.$$

$$AS=\frac{480\,.\,2\,.\,3770}{2\,.\,\pi\,.\,960}=600;\quad t_1=\frac{\pi\,.\,960}{480}=6{,}28\ см.$$

Пример 3. Для выбора типа обмотки и числа пазов статора имеем следующие исходные данные:

Линейное напряжение	$U_N=400$ *в*
Фазный ток	$I_ф=793$ *а*
Диаметр статора	$D_1=62{,}5$ *см*
Число полюсов	$2p=6$
Линейная нагрузка	$AS\cong 380$

По (10) видим, что в данном случае целесообразной является двухслойная катушечная петлевая обмотка статора. По (11) находим возможное число параллельных ветвей обмотки:

$$a=\frac{793}{40\div100\div200}=20\div8\div4.$$

По условиям симметрии обмотки (13) и (13а) находим, что для нашей шестиполюсной машины возможное число параллельных ветвей равно: $a=6$, $a=3$ и в крайнем случае $a=2$. Для определения числа пазов статора выбираем по таблице 1 ток паза $J_п$:

$$1000<J_п<1300$$

по (12) находим:

$$Z=\frac{\pi\,.\,62,5\,.\,380}{1000-1300}=75 \text{ до } 57.$$

Для шестиполюсной машины возможное число пазов, лежащее в этих пределах, и удовлетворяющее условиям симметрии (13), может быть только или 72 или 63. Вписываем эти числа пазов в таблицу вариантов и вычисляем для них: по (13а) — возможное число параллельных ветвей a; по (11) — ток в параллельной ветви I_a; по (13) — число активных проводников в пазу s_n, и по (14) — число пазов на полюс и фазу q.

Таблица вариантов

Возможное число пазов Z	72	63
Возможное число паралл. ветвей a	6(3и2)	3
Ток в параллельной ветви I_a	132,5	265
Число активных проводников в пазу s_n	8,3÷9,8	3,8÷4,9
Число пазов на полюс и фазу q	4	$3^1/_2$

Учитывая все изложенные выше требования и соображения, видим, что первый вариант даёт наилучшую обмотку с точки зрения технологичности и конструктивности.

Итак, принимаем окончательно:

$$Z=72;\ q=4;\ a=6;\ I_a=132,5.$$

Число активных проводников в пазу округляем до ближайшего целого чётного числа, т. е. принимаем: $s_n=8=2\,.\,4$ и по (15) находим:

$$J_n=\frac{8\,.\,793}{6}\approx 1060\ a$$

$$AS=\frac{72.1060}{\pi.62,5}=\frac{72.8.793}{6.\pi.62,5}=387\ a/см$$

$$t_1=\frac{\pi.62,5}{72}=\frac{1060}{387}=2,73\ см.$$

§ 4. Сегментировка и разъём статора *)

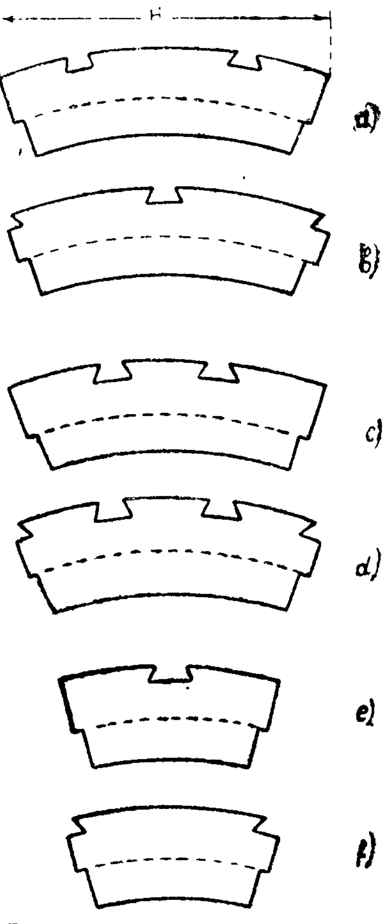


Рис. 1. Расположение ласточкиных пазов в сегментах

Сердечники статоров с внешним диаметром более 99 *см* собираются из отдельных сегментов листовой электротехнической стали. Поэтому, при расчете машины необходимо рассмотреть условия сегментировки и рационально выбрать количество и размеры сегментов, а следовательно, и количество пазов в сегменте. Кроме того, в больших машинах нужно предусмотреть разъём статора на несколько частей для возможности его транспортировки.

Хотя вопросы сегментировки статора разработаны с достаточной полнотой и для осуществления её имеется много возможностей [Л. 1], однако в отдельных случаях число пазов статора, выбранное в электрическом расчете машины, может оказаться крайне нежелательным и даже неприемлемым с точки зрения сегментировки. Поэтому ей необходимо уделить достаточное внимание в электрическом расчете и убедиться в возможности обеспечения удовле-

*) При недостатке времени этот параграф может быть выпущен из курсового проекта.

Таблица 3

Основные (принципиальные) случаи нормальной сегментировки сердечника статора

Укладка сегментов при сборке сердечника статора	Число пазов статора $Z(=SZ_s)$ кратно		Число сегментов в полной окружности статора S	Число пазов в сегменте $Z_s(=\frac{Z}{S})$	Перекрытие (сдвиг) слоёв на часть сегмента, равную φ_c	Расположение ласточкиных пазов по рисунку	Возможное число ласточкиных клиньев (брусьев) в статоре
Нормальная (замкнутыми слоями)	6	Любое целое	четное кратное 3	четное не кратное 3	$^1/_2$	1a (или 1в)	2S (или S четн.)
	6		нечетное кратное 3	— " —	$^1/_2$	1a или 1в	2S (или S нечетное)
	6		четное, кратное или не кратное 3	нечетное, кратное 3	$^1/_3$	1c или 1d	3S (или $\frac{3S}{2}$)
	3		нечетное, кратное или некратное 3	— "	$^1/_3$	1c или 1d	3S
Винтовая (непрерывно восходящей спиралью)	6	Любое дробное вида	нечетное + $^1/_3$	нечетное, кратное 3	$^1/_3$	1c или 1d	3S или $\frac{3S}{2}$
	6		четное + $^2/_3$	— " —	$^1/_3$	1c или 1d	3S или $\frac{3S}{2}$
	3		четное + $^1/_2$	четное, кратное 3	$^1/_2$	1a или 1в	2S (нечетное)
	3		нечетное + $^1/_2$	— " —	$^1/_2$	1a или 1в	2S (нечетное)
	3		четное + $^1/_3$	нечетное, кратное 3	$^1/_3$	1c или 1d	3S (нечетное)
	3		нечетное + $^2/_3$	— " —	$^1/_3$	1c или 1d	3S (нечетное)

творительной сегментировки;детали же её будут разработаны при конструировании машины.

Нормальные случаи сегментировки статора, предполагающие компаундный штамп, сведены в таблицу 3, не требующую особых пояснений.

Кроме основных способов сегментировки, указанных в таблице 3, можно, в случае надобности, использовать специальные приёмы, расширяющие возможности сегментировки, а именно:

а) увеличенное количество ласточкиных пазов в сегменте, превышающее число ласточкиных клиньев (брусьев) в $1^1/_2$, 2, 3... раза;

в) сегменты двух различных размеров (вместо одного большого сегмента);

с) неравномерное (например, двух- и трёхразмерное) распределение ласточкиных клиньев (брусьев) по окружности статора;

д) дробное число обмоточных пазов в сегменте (вида $K+^1/_2$) при чередующейся укладке нормально положенных сегментов с сегментами, повернутыми на 180° вокруг их радиальной центровой линии (в зеркальном отображении);

е) сдвиг слоев железа на дробную часть сегмента, отличающуюся от простой дроби вида $^1/_2$, $^1/_3$ на $^1/_4$ (двухразмерное распределение стыков).

С помощью этих и других средств можно найти индивидуальное решение сегментировки практически для любого числа пазов статора за счет некоторого удорожания компаундного штампа и усложнения производственных операций.

С точки зрения развития трансформаторных подшипниковых токов [Л. 14] величина сдвига (перекрытия на угол φ_c) сегментов одного слоя относительно сегментов предыдущего слоя имеет важное значение. Перекрытие на $^1/_2$ сегмента практически весьма удобное, является в этом отношении наименее желательным, так как в плоскости стыков оно уменьшает сечение железа спинки статора на половину. Перекрытия сегментов на $\varphi_c=^1/_3$, $^1/_4$, $^1/_5$, если они производятся в одном неизменном направлении (на угол $+\varphi_c$), ослабляют сечение спинки соответственно на $^1/_3$, $^1/_4$, $^1/_5$.

Если же эти перекрытия делаются попеременно вправо и влево, т. е. на угол $\pm\varphi_c$ (с чем иногда приходится мириться в упомянутом выше случае (а), то сечение спинки ослабляется на $^1/_2$, а плоскости стыков отстоят, чередуясь, на малый и на большой шаг.

Количество плоскостей стыка при перекрытии сегментов в одном неизменном направлении ни угол $+\varphi$ равно·

$$N = \frac{S}{\varphi_c}. \qquad (16)$$

Количество стыков при перекрытии на угол $\pm\varphi_c$ равно:

$$N = 2S. \qquad (16а)$$

Количество плоскостей стыков влияет на развитие трансформаторных подшипниковых токов. Если t_0 — общий наибольший делитель чисел $2p$ и N, то [Л. 14] желательно, чтобы:

$$\frac{2p}{t_0} = \text{нечётное число}. \qquad (16в)$$

Случай, когда $\frac{2p}{t_0}$ = чётное число, менее благоприятен.

Из указанных выше специальных приёмов сегментировки наиболее удобен способ (а), позволяющий подобрать желаемое количество ласточкиных клиньев (брусьев) за счет применения добавочных ласточкиных пазов в сегментах.

Если обозначить:

φ_s — сегментный угол, принимаемый за единицу угла;

φ_k — угол (угловой шаг) ласточкиных клиньев;

φ_c — угловой сдвиг (перекрытие) сегментов одного слоя относительно сегментов предыдущего слоя (он всегда кратен пазовому углу φ_z);

φ_Δ — угловой шаг ласточкиных пазов, то абсолютная величина φ_Δ при применении добавочных ласточкиных пазов равна:

$$\varphi_\Delta = [\varphi_c - \varphi_k]. \qquad (17)$$

При этом число ласточкиных пазов в сегменте:

$$Z_\Delta = \frac{1}{\varphi_\Delta} \qquad (17а)$$

и отношение α_0 полного числа ласточкиных клиньев (брусьев) в окружности статора к полному числу ласточкиных пазов:

$$\alpha_0 = \frac{\varphi_\Delta}{\varphi_k}. \qquad (17в)$$

Разъём статора на несколько частей обусловливается транспортными и монтажными соображениями. Машины с внешним диаметром статора до 3,5÷4 метров можно выполнять и

транспортировать неразъёмными. При больших внешних диаметрах предусматривается разъём его на 2 части для машин с горизонтальным валом, и разъем на 2, 3, 4, (5), 6 (и более) частей для машин с вертикальным валом. Обычно разъём выполняют на равные части, хотя в отдельных случаях возможно отступление от этого правила, что определяется делимостью числа сегментов в окружности статора и числа ласточкиных клиньев (брусьев) на соответствующие равные части, а в гидрогенераторах подвесного типа — связано с числом лап верхней крестовины.

Стыки частей статора (плоскости разъёма) желательно выбирать так, чтобы они проходили не через ласточкины клинья, а в промежутке между ними.

Для наилучшего использования площади нормальных листов электротехнической стали (с размерами 75×150; 86×172 и 100×200 *см*) желательно, чтобы большая хорда H сегментов (рис. 1) не выходила из пределов

$$H \approx 37 \div 74 \div 85 \div (99) \text{ см.} \tag{18}$$

Если обозначить:

S – число сегментов в полной окружности статора (оно может быть целым и дробным);

D_a – наружный диаметр сердечника статора (который на данной стадии расчета еще не известен), то:

$$H = D_a \sin\left(\frac{180^\circ}{S}\right) \approx \left[D_i\left(1 + \frac{2}{2p}\right) + (10 \div 30)\right] \sin\left(\frac{180^\circ}{S}\right) \text{ см.} \tag{18а}$$

Здесь прибавки 10 и 30 *см* обозначают двойную глубину паза и относятся соответственно к малым и большим машинам.

Если число сегментов $S \gg 8$, то приближенно получаем:

$$H \approx \frac{\pi D_a}{S} \approx \frac{\pi}{S}\left[D_i\left(1 + \frac{2}{2p}\right) + (10 \div 30)\right] \text{ см.} \tag{18в}$$

Сегменты с хордой $H = 37 \div 40$ *см* должны, как правило, удерживаться, по крайней мере, двумя ласточкиными клиньями (брусьями), а сегменты с хордой $H \gg 50$ *см* — тремя и более

клиньями. Поэтому расстояние между ласточкиными клиньями по внешней окружности статора должно быть в пределах $18 \div 30 \div (40)$ *см.**

Число пазов в сегменте, равное $Z_s = \frac{Z}{S}$, может быть чётным и некратным 3 или чётным и кратным 3, а также нечётным и кратным 3 (см. таблицу 3). В отмеченных выше специальных случаях оно может быть любым целым числом, а также дробным вида $K + {}^1/_2$.

Приступая к выбору сегментировки, находим по (18) и (18в) предельные количества сегментов в окружности статора:

$$S \approx \frac{\pi D_a}{37 \div 74 \div 85 \div (99)} \quad (19)$$

и по полученным из (19) значениям S определяем соответствующие им предельные числа пазов в сегменте

$$Z_s = \frac{Z}{S} \quad (19a)$$

Затем составляем таблицу вариантов по образцу таблицы 4 и вписываем в нее требуемое число пазов Z в виде нескольких вариантов произведения из подходящего целого или дробного числа сегментов S на подходящее целое число пазов в сегменте Z_s, а также в виде произведения из подходящего целого и чётного числа сегментов на подходящее дробное число пазов в сегменте Z_s (вида $K + {}^1/_2$), заключая в скобки нежелательные варианты и подчеркивая наиболее удачные.

Далее вычисляем по (18а) соответствующие значения H, устанавливаем с помощью таблицы 3 и рис. 1 расположение ласточкиных пазов в сегменте, находим число ласточкиных клиньев (брусьев) и расстояние между ними, намечаем условия разъёма статора и выбираем наилучший вариант, как показано в примере.

Для нашего второго примера находим с помощью (18) и (19):

$$S \approx \frac{\pi \left[960 \left(1 + \frac{2}{68}\right) + 30 \right]}{37 \div 74 \div 85 (99)} \approx 86 \div 43 \div 37 (32)$$

---

*) В больших гидрогенераторах конструкторы охотно применяют сегменты с хордой около 74 *см*, опирая их на два ласточкиных клина.

и с помощью (19а):

$$z_s \approx \frac{480}{86 \div 43 \div 37(32)} \simeq 5{,}6 \div 11 \div 13(15).$$

Сопоставляя таблицу 4, вписываем в нее все возможные варианты произведений $S \, . \, z_s$ и вычисляем для них по (18а) соответствующие значения хорд H.

Из этих вариантов выбираем наиболее целесообразный с точки зрения величины хорды H и делимости числа сегментов на предполагаемое число разъёмов статора (6).

Очевидно, что окончательный выбор нужно делать между вариантами: 60 сегментов по 8 пазов и 48 сегментов по 10 пазов. Для них подбираем расположение ласточкиных пазов на сегменте по таблице 3 и рис. 1, определяем число ласточкиных клиньев и расстояние между ними, как показано в таблице 4.

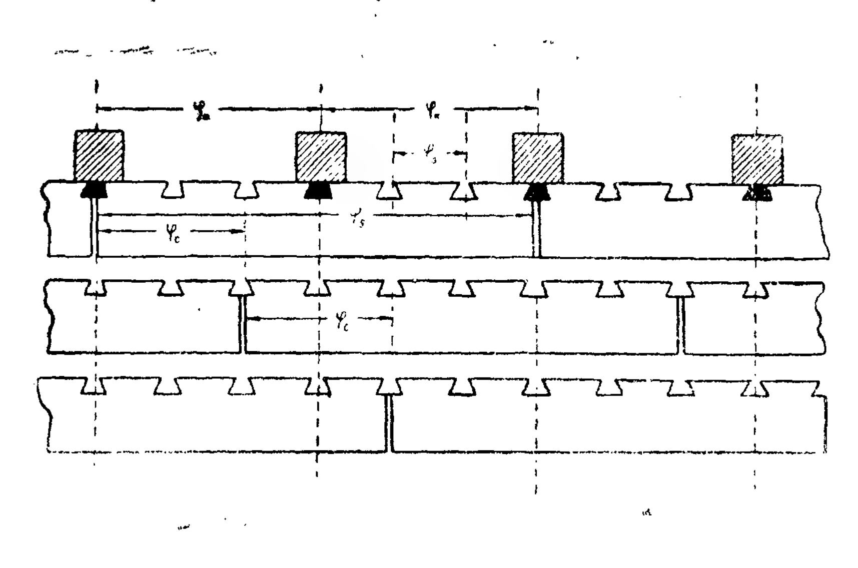


Рис. 2. Схема сегментировки к таблице 5

Останавливаемся на варианте 48 сегментов по 10 пазов, так как он даёт почти идеальное использование нормальных листов стали с размерами 100×200 *см*, разрезанных предварительно на три части. По (16) и (16в) находим: число плоскостей стыков $N=48 \, . \, 2=96$; $t_0=4$; $\frac{2p}{t_0}=17$ нечётное число, т. е. в отношении подшипниковых токов сегментировка является благоприятной.

Таблица 4

Варианты сегментировки и разъём статора

$D_a = 1020$ *см*; $Z = 480$

S	86		43	(37)		(32)	
Z_s	5,5		11	13		(15)	
$SZ_s = 480$	80×6	(64×7,5)	60×8	(53 1/3×9)	48×10	(40×12)	(32×15)
H	40 см	(50)	53,3	(60)	66,7	(80)	(99)
Расположение ласточкиных пазов по рис.			1а		1а		
Число ласточкиных клиньев			120		96		
Расстояние между клиньями			26,7		33,4		
Разъём статора			6 по 10 сегм. и 20 клин.		6 по 8 сегм. и 16 клин.		

Для иллюстрации специальной сегментировки с использованием одного из упомянутых выше способов, рассмотрим пример, данный в таблице 5, составленной аналогично таблице 4.

Таблица 5

Варианты сегментировки и разъёма статора

$D_a=1020$ *см*; $Z=486$

S	86	43	37	(32)
Z_s	5,6	11,3	13,1	(15)
$S \times Z_s=486$	81×6	54×9	$(41^1/_2 \times 12)$	$(36 \times 12{,}5)$
H	39,5	59,3	78,7	89
Расположение ласточкиных пазов по рис.		2		
Число ласточкиных клиньев		108		
Расстояние между клиньями		29,5		
Разъём статора		6 частей по 9 сегм. и 18 клин.		

С точки зрения разъёма статора на 6 равных частей подходящим является только вариант с 54 сегментами по 9 пазов. Однако, если принять для него нормальную сегментировку по таблице 3 и рис. 1с или рис. 1*d*. т. е. принять три клина на сегмент при перекрытии (сдвиге) сегментов на $^1/_3$, то получим $54 \times 3=162$ клина, с расстоянием между ними <20 *см*, что для большой машины слишком мало и нецелесообразно. Поэтому примем 2 клина на сегмент с шагом ~ 30 *см*.

Чтобы осуществить такой вариант и в то же время крепить каждый сегмент по крайней мере двумя клиньями, придется применить указанный выше способ (а), требующий увеличенного количества ласточкиных пазов.

В соответствии с (17), (17а) и (17в) имеем: $\varphi_k={}^1/_2$ и $\varphi_c={}^1/_3$, а поэтому угловой шаг ласточкиных пазов по (2):

$$\varphi_\Delta=[{}^1/_3-{}^1/_2]={}^1/_6.$$

Число ласточкиных пазов в сегменте по (17а):

$$Z_\Delta=\frac{1}{{}^1/_6}=6.$$

Используемое количество ласточкиных пазов по (17в):

$$\alpha_0=\frac{1\,.\,2}{6\,.\,1}={}^1/_3.$$

Схематическое изображение рассмотренной сегментировки дано на рис. 2.

§ 5. Шаги обмотки статора, коэффициент обмотки и фазное число витков

В петлевых обмотках шаг катушки y_1 принимается сокращенным до $0{,}8\div0{,}85$ полюсного деления, что даёт экономию меди лобовых соединений и улучшает электромагнитные свойства обмотки.

Если обозначить через τ_0 полюсное деление, выраженное числом пазовых делений, и через β — сокращение шага катушки, то будем иметь следующие соотношения:

$$\tau_0=\frac{Z}{2p}=3q\ , \tag{20}$$

$$\beta=\frac{y_1}{\tau_0}\ . \tag{20а}$$

В волновых обмотках с $s_п=2$ и $s_п=1{,}5$ сокращение первого шага y_1 не даёт экономии меди лобовых соединений. Поэтому, для улучшения электромагнитных свойств волновых обмоток можно применять не только сокращение шага y_1, но и его удлинение, что расширяет возможности подбора желаемого коэффициента обмотки. При укороченном и при удлиненном шаге y_1 имеем соответственно:

$$\left.\begin{aligned}\beta&=\frac{y_1}{\tau_0}\\ \beta&=\frac{2\tau_0-y_1}{\tau_0}\end{aligned}\right\}. \tag{20в}$$

Коэффициент обмотки f_w есть произведение коэффициента сокращения f_β на коэффициент распределения f_q и в **общем** виде равен для основной волны[Л. 9]:

$$f_w = f_\beta \times f_q = sin(90\beta)^\circ \times \frac{0,5}{(bd+c)sin\left(\frac{30^\circ}{bd+c}\right)} \cdot \qquad (21)$$

Здесь: $bd+c$ – брать из § 3, форм. (14).

Если q — целое число, то в (21) вместо $bd+c$ подставлять целое число q.

В предварительных расчетах можно принимать $f_q=0,95$ и вычислять обмоточный коэффициент по формуле:

$$f_w \approx f_\beta \times f_q \approx sin(90\beta)^\circ \cdot 0,95. \qquad (21a)$$

Число последовательно включенных витков одной фазы w или, короче, – фазное число витков как в петлевых, так и в волновых двухслойных и полутораслойных обмотках равно:

$$w = \frac{Z \cdot s_п}{6a}, \qquad (22)$$

а действующее число витков

$$w^1 = f_w \cdot w. \qquad (22a)$$

Пример 1. По (20) находим:

$$\tau_0 = 3 \cdot 3 = 9.$$

Примем $y_1=7$; при этом:

$$\beta = \frac{7}{9} = 0,78.$$

По (21а) находим:

$$f_w = 0,95 \cdot sin(90 \cdot 0,78)^\circ = 0,95 \cdot 0,939 = 0,892 \approx 0,89.$$

С помощью (22) и (22а) получаем:

$$w = \frac{54 \cdot 14}{6 \cdot 2} = 63.$$

$$w^1 = 63 \cdot 0,89 = 56,2.$$

Пример 2. Имеем по (20):

$$\tau_0 = 3 \cdot 2^6/_{17} = 7^1/_{17}.$$

Примем $y_1=6$; при этом получаем по (20в):

$$\beta=\frac{6}{7^1/_{17}}=\frac{6 . 17}{120}=0,85.$$

По (21а) находим:

$$f_w=0,95 . sin(90 . 0,85)^\circ=0,95 . 0,965=0,917.$$

С помощью (22) и (22а) получаем:

$$w=\frac{480 . 2}{6 . 2}=80.$$

$$w^1=80 . 0,917=73,3.$$

Пример 3. По (20) находим диаметральный шаг:

$$\tau_o=\frac{72}{6}=3\times4=12.$$

Примем первый шаг катушки равным:

$$y_1=10.$$

При этом получим сокращение шага:

$$\beta=\frac{10}{12}=0,833.$$

По (21а) вычисляем обмоточный коэффициент сокращения, коэффициент распределения и полный обмоточный коэффициент:

$$f_\beta=sin(90 . 0,833)^\circ=0,962.$$

$$f_q\approx0,95.$$

$$f_w=f_\beta\, f_q=0,962 . 0,95=0,915.$$

С помощью (22) и (22а) определяем фактическое и действующее фазное число витков обмотки статора:

$$w=\frac{72 . 8}{6 . 6}=16.$$

$$w^1=0,915 . 16=14,65.$$

§ 6. Размеры паза, изоляции и проводников обмотки статора

Ширина открытого паза $b_п$ и его глубина $h_п$ находятся в пределах:

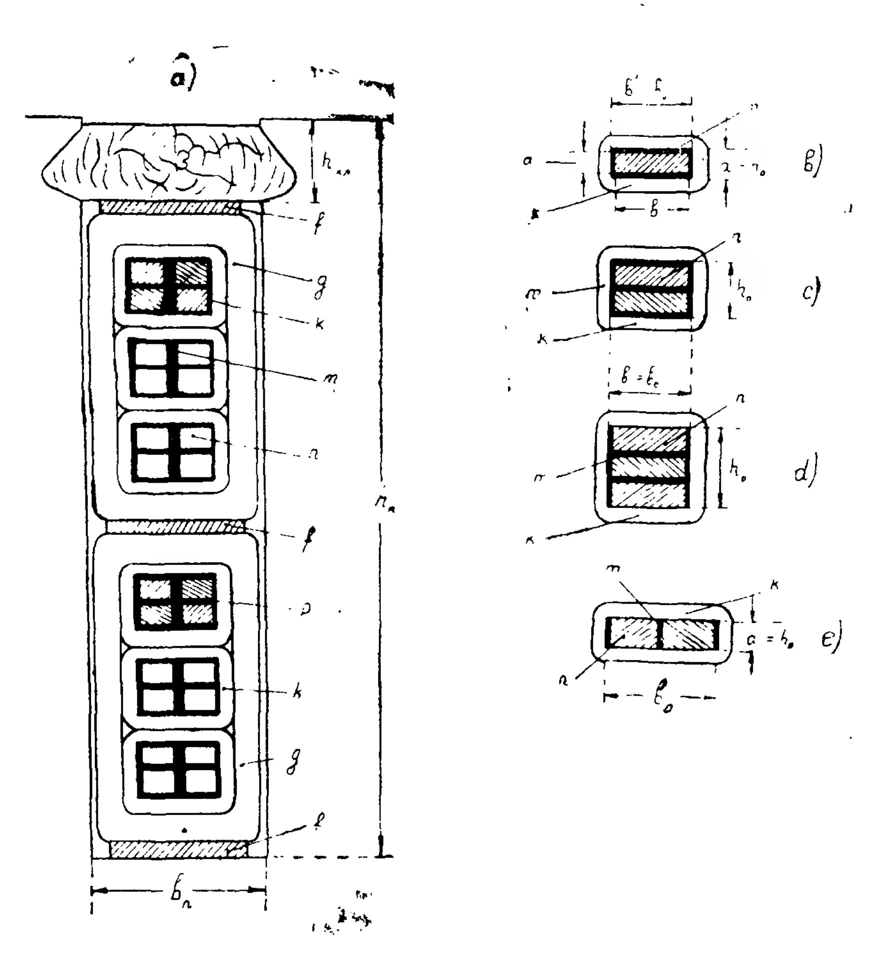


Рис. 3. Эскизы витковой и корпусной изоляции двухслойной катушечной обмотки.

Малые машины: $\left.\begin{array}{l} b_п \approx (0{,}38 \div 0{,}48)t_1 = 0{,}42t_1 \pm 15\% \\ h_п \cong (4 \div 5{,}5)b_п \end{array}\right\}$, (23)

Большие машины: $\left.\begin{array}{l} b_п \approx (0{,}3 \div 0{,}45)t_1 \approx 0{,}4t_1 \pm 10\% \\ h_п \approx (4{,}5 \div 7{,}5)b_п \end{array}\right\}$. (23а)

По абсолютной величине ширина паза находится в пределах от (0,9 - 1) *см* в малых машинах до (2,5—2,8) *см* в больших машинах, а глубина паза, соответственно, от (3,5—5) *см* до (15—18) *см*.

Катушки двухслойных катушечных обмоток могут иметь два, три и более витков (рис. 3а и 5), состоящих из одного, двух, трех, четырех..., вообще из *с* изолированных элементарных (т. е. включенных параллельно) проводников, с сечением не более 15—16 $мм^2$ каждый, связанных в один пучок общей витковой изоляцией *к*. Группа из нескольких витков покрывается общей корпусной (пазовой) изоляцией g (рис. 3а) и образует «плечо» катушки. На рис. 3в, 3с, 3d и 3е изображены активные проводники (витки), состоящие соответственно, из одного, двух трех, двух, а на рис. 3а—из четырех элементарных проводников, при следующих обозначениях, n — элементарный проводник: m — асбестоновая или хлопчатобумажная изоляция элементарных проводников; k — витковая изоляция из микаленты; (рис. 3 и рис. 5); g — корпусная (пазовая) изоляция из микаленты; f — прокладки из миканита; *a* и b — размеры голого элементарного проводника; a^1 и b^1 — его размеры с изоляцией; b_0 и h_0 — ширина и высота активного проводника (витка) без витковой изоляции.

Размеры активного витка без витковой изоляции, т. е. его высота h_0 и его ширина b_0 (рис. 3), связаны с размерами a^1 и b^1 и с количеством *с* элементарных изолированных проводников следующими очевидными соотношениями, приведенными в таблице 5а.

Таблица 5а

c	№ рисунка	h_0	b_0
1	3b и 5	a^1	b^1
2	3c	$2a^1$	b^1
2	3e	a^1	$2b^1$
3	3d	$3a^1$	b^1
4	3a	$2a^1$	$2b^1$

и так далее

Суммарная толщина корпусной и витковой изоляции по ширине и по высоте паза для катушечных обмоток дана в таблице 6.

Таблица 6

Размеры (в *мм*) непрерывной изоляции двухслойных катушечных обмоток (рис. 3)

Напряжение вольты	Двухсторонняя толщина изоляции по ширине паза $2\delta_i$ в *мм*	Полная толщина изоляции в *мм* по высоте паза δ_2 (включая прокладки и проч.) при числе витков в катушке, равном:								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
550 и ниже	4,0	11,2	11,4	11,6	11,8	12	12,2	12,4	12,6	12,8
3150	4,5	12,4	12,8	13,2	13,6	14	14,4	14,8	15,2	15,6
6300	6,4	16,4	17	17,6	18,2	18,8	19,4	20	20,6	21,2
10500	10,9	29,5	31,9	34,3	36,7	39,1	41,5	43,9	—	—
13800	12,4	32,6	34,9	37,3	39,7	42,1	44,3	46,7	—	—
15750	13,4	34,5	36,9	41,7	44,1	46,5	48	—	—	—

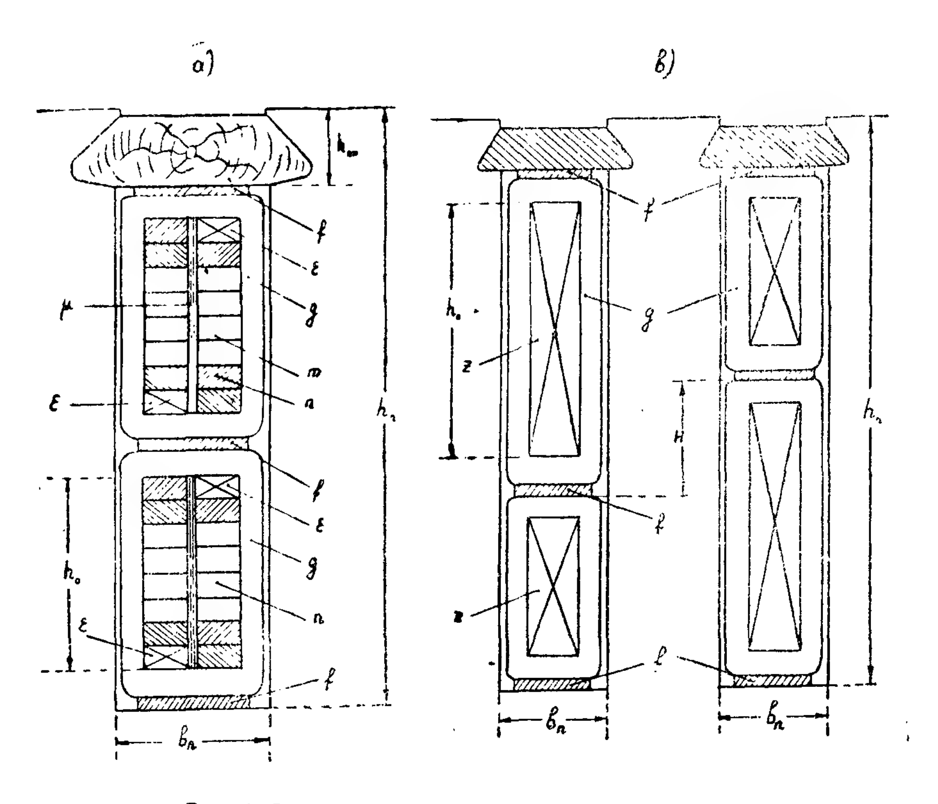


Рис. 4. Эскиз изоляции и расположения проводников в стержневых двухслойных и полутораслойных обмотках.

Таблица 7

Размеры (в *мм*) непрерывной изоляции стержневых двухслойных и полутораслойных обмоток (рис. 4)

Напряжение вольты	Двухсторонняя толщина по ширине паза (включая вертикальную прокладку) $2\delta_1$	Суммарная толщина изоляции по высоте (включая прокладки и проч.) δ_2
Ниже 3000	5,4	16,1
3150	5,9	17,1
6300	8,3	23,4
10500	10,5	28,5
13800	12	31,5
15750	13	33,5

Таблица 8

Нормальные размеры обмоточной меди в *мм* (коэффициент нарастания ≈ 1,08)

1,00	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,56	1,68	1,81	1,95
2,10	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,80	
4,10	4,40	4,70	5,10	5,50	5.90	6,40	6,90	7,40	
8,00	8,60	9,30	10,0						

Примечание: Производные ряды меньших и больших размеров получаются из указанного основного ряда перенесением запятой на одно место влево, или на одно место вправо.

Размеры сторон a и b прямоугольной меди можно брать в любых сочетаниях из основного и производного рядов (таблицы обмоточной меди, принятые ГОСТ'ом и заводскими нормами, имеют ограниченное количество сочетаний и подверглись некоторым изменениям).

Двухсторонняя толщина Δ хлопчатобумажной изоляции марки ПБД зависит об большего размера b проводника следующим образом:

b (*мм*)	Δ (*мм*)
от 0,74 до 1,45	0,25
от 1,56 до 2,10	0,30
от 2,26 и выше	0,35

Двухсторонняя толщина асбестовой изоляции во всех случаях равна $\Delta_a = 0{,}35$ *мм*.

В стержневых двухслойных и полутораслойных обмотках (рис. 4) активные проводники (стержни) составляются из многих, вообще из c, элементарных проводников n, расположенных в виде двух столбиков, разделенных вертикальной изолирующей прокладкой μ. Элементарные проводники n имеющие собственную (обычно — асбестоновую) изоляцию m, переплетены (транспонированы) между собою [Л. 1, 10] для избежания циркуляционных токов внутри стержня и отделены от стенок паза корпусной изоляцией g, которая одновременно является и витковой изоляцией.

Для осуществления транспозиции требуется добавочное место ε по высоте стержня (рис. 4), равное толщине a^1 изолированного элементарного проводника, а потому высота h_0 одного стержня без корпусной изоляции (рис. 4) равна:

$$h_0 = a^1\left(\frac{c}{2} + 1\right) мм. \tag{23в}$$

Суммарная толщина корпусной изоляции по ширине паза, включая вертикальную прокладку μ, и суммарная толщина корпусной изоляции двух стержней по высоте паза, включая три прокладки f (рис. 4), даны в таблице 7.

Приступая к выбору размеров паза, нужно определить требуемое поперечное сечение активного проводника, исходя из допустимой плотности тока. Критерием при выборе плотности тока j_a служит произведение:

$$AS \cdot j_a = (1400 \div 1800) \approx 1600 \pm 10\% \; ^{*)} \tag{24}$$

Из (24) получаем:

$$j_a \approx \frac{1600}{AS} a/мм^2 \tag{24а}$$

Определив значение j_a, находим сечение активного проводника одной параллельной ветви:

$$q \approx \frac{I_ф}{a j_a} мм^2 . \tag{24в}$$

Здесь: a — число параллельных ветвей обмотки статора, установленное в § 3.

*) Для машин с пониженными нагревами значения $AS \cdot j_a$ нужно уменьшить на 20—25%.

Размеры паза при петлевых и стержневых двухслойных обмотках определяются следующими слагаемыми:

$$b_п = 2\delta_1 + b_о + 0{,}6 \ мм, \qquad (25)$$

$$h_п = \delta_2 + s_п h_о + 0{,}4 + 0{,}3 b_п \ мм. \qquad (25а)$$

Здесь $2\delta_1$ и δ_2 — суммарная толщина витковой и корпусной изоляции по ширине и, соответственно, по высоте паза (берется по заводским нормалям или по таблицам 6 и 7);

$b_о$ и $h_о$ — ширина и высота активного проводника (витка) без витковой и корпусной изоляции (рис. 3 и 4);

$s_п$ — число активных проводников (витков) в пазу;

0,6 и 0,4 — прибавки на неточность штамповки и сборки железа;

$0{,}3 b_п \approx h_{кл}$ — толщина клина (рис. 3 и 4).

С помощью (25), (23) или (23а) определяем предварительную ширину $b_о$ активного проводника (витка) или стержня, состоящего из с соединенных параллельно изолированных элементарных проводников (рис. 3 и 4)

$$b_о \approx b_п - 2\delta_1 - 0{,}6 \ мм. \qquad (26)$$

В случае петлевой катушечной обмотки, определив $q_а$ по (24в), подбираем с помощью таблицы 8 размеры и количество элементарных изолированных проводников (с асбестоновой или с хлопчатобумажной изоляцией ПБД) таким образом, чтобы получалось нужное сечение $q_а$ активного проводника при ширине его, приблизительно равной величине $b_о$, вычисленной по (26). При подборе размеров элементарных проводников необходимо соблюдать следующие технологические требования:

а) сечение элементарного проводника $q^1_а = a \cdot b \leqslant 15 \ мм^2$

в) ширина элементарного проводника $b \leqslant 6{,}4 \ мм$

с) отношение размеров $\frac{b}{a}$ должно быть или 1, или $\geqslant 1{,}16$,

т. е. b должно отличаться от a не менее, чем на два размера (см. таблицу 8).

Выбрав размеры, число c и расположение элементарных проводников в активном витке по одному из вариантов рис 3

и 5, определяем ширину b_0 и высоту h_0 активного проводника (без витковой изоляции, но с учетом толщины изоляции элементарных проводников по таблице 5а и 8).

Далее, пользуясь таблицей 6, находим окончательные размеры паза, сечения проводника и плотности тока по (25), (25а) и (27), а по (28) и (28а) проверяем перепад температуры в пазовой изоляции.

В случае стержневой двухслойной обмотки, определив по (26) величину b_0 выбираем по таблице 8 элементарный проводник с асбестоновой изоляцией таким образом, чтобы его размер (толщина) а 2,44(2,63) *мм*, а его ширина с изоляцией $b^1 \precsim \frac{b_0}{2}$. Число c элементарных проводников вычисляем по формуле:

$$c = \frac{q_a}{a \times b}, \qquad (26а)$$

округляя результат до ближайшего целого и чётного числа.

Затем находим окончательные размеры стержня b_0 и h_0 (рис. 4) без корпусной изоляции и без вертикальной прокладки μ (рис. 4а):

$$\left.\begin{aligned} b_0 &= 2b^1 \\ h_0 &= a^1 \left(\frac{c}{2} + 1\right) \end{aligned}\right\}. \qquad (26в)$$

Наконец, с помощью таблицы 7, (25) и (25а) вычисляем окончательные размеры паза, округляя размер $b_п$ до 0,5 *мм*, а $h_п$ — до целого числа *мм*.

Выбрав таким образом размеры паза, изоляции и проводников катушечной или стержневой обмотки, устанавливаем окончательные значения q_a и j_a:

$$\left.\begin{aligned} q_a &= c(a \times b - 0{,}2) \ мм^2 \\ j_a &= \frac{I_ф}{a q_a} = \frac{I_a}{q_a} \ а/мм^2 \end{aligned}\right\}. \qquad (27)$$

Здесь 0,2 $мм^2$ — уменьшение сечения проводника, вследствие закругления его углов.

В заключение проверяем средний и наибольший перепад температуры в изоляции:

$$\vartheta_i = \frac{0,039 \cdot J_п \cdot j_а \cdot 2\delta_i}{b_п + h_п - h_{кл.}} < 30°Ц. \quad (28)$$

$$\vartheta_{i\,max} = 0,03 j_а^{\,2} (\Sigma b) 2\delta_i < 40°Ц. \quad (28а)$$

Здесь: $J_п$ — ток паза;

$j_а$ — плотность тока по (27);

$2\delta_i$ — двухсторонняя толщина изоляции в *мм* (по табл. 6 или 7);

$b_п$ и $h_п$ — размеры паза в *мм*;

$h_{кл}$ — толщина клина в *мм*, по (25а);

Σb — суммарная ширина меди (по ширине паза) в *мм*.

Следует иметь в виду, что размеры паза и проводников окончательно утверждаются только после расчета реактивных сопротивлений обмотки (§ 13).

Пример 1. По (24) примем: $AS \cdot j_а = 1400$; тогда по (24а) и (24в) находим:

$$j_а = \frac{1400}{308} = 4,53 \ а/мм^2;$$

$$q_а = \frac{115}{a \cdot 4,53} = 12,7 \ мм^2.$$

Так как $q_а < 15$ *мм*², то активный проводник (виток) будет состоять из одного элементарного проводника. Для определения его размеров находим по (23) ширину паза:

$$b_п \approx 0,4 \cdot 26,2 = 10,5 \ мм.$$

Приняв расположение витков по рис. 5, находим с помощью таблицы 6 и формулы (26) ширину изолированного проводника (сравнить таблицу 5а):

$$b_o = b^1 = 10,5 - 4 - 0,6 = 5,9 \ мм.$$

С помощью таблицы 8 находим двухстороннюю толщину Δ изоляции проводника и ширину голого проводника b, округлив её до стандартного размера:

$$\Delta = 0,35 \ мм;$$

$$b = b^1 - \Delta = 5,9 - 0,35 = 5,55 \approx 5,5 \ мм.$$

Следовательно, толщина a голого проводника, с округлением до стандартного размера:

$$a=\frac{q_a}{b}=\frac{12,7}{5,5}=2,31\approx2,26 \text{ мм}.$$

Итак, окончательные размеры голого и изолированного проводника (по таблице 8):

$$\frac{a\times b}{a^1\times b^1}=\frac{2,26\times5,5}{2,61\times5,85}.$$

Поперечное сечение проводника и плотность тока по (27):

$$q_a=1(2,26\times5,5-0,2)=12,3 \text{ мм}^2;$$

$$j_a=\frac{115}{2\,.\,12,3}=4,68 \text{ а/мм}^2.$$

Так как в нашем примере, по рис. 3в, рис. 5 и таблице 5а:

$$b_0=b^1=5,85 \text{ и } h_0=a^1=2,61 \text{ мм},$$

то окончательные размеры паза,по (25), (25а) и табл. 6:

$$b_п=4+5,85+0,6=10,45\approx10,5 \text{ мм};$$

$$h_п=12,2+2\times7\times2,61+0,4+0,3\,.\,10,5=52,25\approx52 \text{ мм}.$$

Эскиз с расположением проводников в плече катушки дан на рис. 5.

Средний и наибольший перепад температуры в пазовой изоляции, по (28) и (28а):

$$\vartheta_i=\frac{0,039\,.\,807\,.\,4,68\,.\,4}{10,5+52-3,15}\cong10°Ц.$$

$$\vartheta_{imax}=0,03\,.\,4,68^2\,.\,5,5\,.\,4=14,5°Ц.$$

Пример 2. Пользуясь данными из § 3, находим по (24а) и (24в):

$$j_a=\frac{1600}{600}=2,67 \text{ а/мм}^2;$$

$$q_a=\frac{3770}{2\,.\,2,67}=710 \text{ мм}^2.$$

С помощью таблицы 7 и (26) получаем:

$$b_0=0,4\,.\,62,8-12-0,6=12,4 \text{ мм}.$$

Следовательно, ширина b^1 элементарного проводника с асбестоновой изоляцией должна быть:

$$b^1 = \frac{12,4}{2} = 6,2 \text{ мм}.$$

По таблице 8 выбираем элементарный проводник с размерами: $a \times b = 2,44 \times 5,9$ и $a^1 \times b^1 = 2,74 \times 6,2$.

Число элементарных проводников определяем по (26а):

$$C = \frac{710}{2,44 \times 5,9} \cong 50.$$

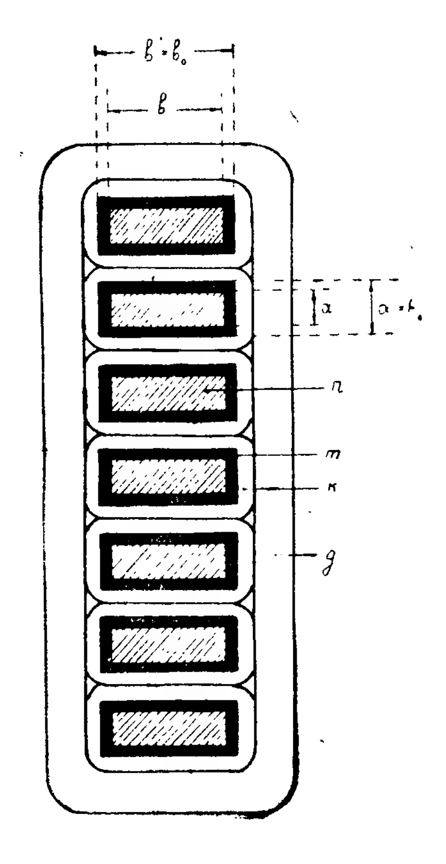


Рис. 5. Эскиз расположения изоляции и активных проводников (витков), состоящих из одного элементарного проводника

С помощью (26в) находим размеры стержня без корпусной изоляции:

$$b_o=2\times6{,}2=12{,}4 \text{ мм};$$

$$h_o=2{,}74\left(\frac{50}{2}+1\right)=71{,}5\approx72 \text{ мм}.$$

По таблице 7, (25) и (25а) определяем размеры паза:

$$b_п=12+12{,}4+0{,}6=25 \text{ мм};$$

$$h_п=31{,}5+2\,.\,72+0{,}4+0{,}3\,.\,25=184 \text{ мм}.$$

Итак, размеры паза:

$$b_п\times h_п=2{,}5\times18{,}4 \text{ см и } \frac{h_п}{b_п}=\frac{18{,}4}{2{,}5}\cong7{,}4.$$

По (27) находим окончательные значения q_a и j_a:

$$q_a=50(2{,}44\times5{,}9-0{,}2)=710 \text{ мм}^2;$$

$$j_a=\frac{3770}{2\,.\,710}=2{,}65 \text{ амп/мм}^2.$$

Проверяем перепад температуры в изоляции по (28) и (28а):

$$\vartheta_i=\frac{0{,}039\,.\,3770\,.\,2{,}65\,.\,12}{25+184-7{,}5}=23{,}4<30°Ц.$$

$$\vartheta_{imax}=0{,}03\,.\,2{,}65^2\,.\,2\,.\,5{,}9\,.\,12=30{,}4<40°Ц.$$

Пример 3. В соответствии с примечанием к формуле (24) примем:

$AS\,.\,j_a\approx1250$. Далее, по (24а) и (24в) находим предварительно:

$$j_a\approx\frac{1250}{387}\approx3{,}23 \text{ а/мм}^2;$$

$$q_a\approx\frac{793}{6\,.\,3{,}23}\approx41 \text{ мм}^2.$$

Так как найденное q_a больше 15 $мм^2$, то по технологическим требованиям активный проводник должен состоять не меньше, чем из трех элементарных проводников, т. е.

$$C=\frac{41}{15}=2,7\approx 3.$$

Принимаем расположение трех элементарных проводников по рис. 3d. По (23a) определяем предварительную ширину паза:

$$b_п\approx 0,44t_1=0,44\,.\,27,3\approx 12\ мм.$$

По (24) находим с помощью таблиц 5a и 6 предварительную ширину b_0 активного проводника (рис. 3d):

$$b_о=b^1=12-4-0,6=7,4\ мм.$$

Учитывая, что по технологическим требованиям ширина голого элементарного проводника не должна быть более 6,4 *мм* выбираем по таблице 8 проводник с асбестоновой изоляцией и с размерами:

$$\frac{a\times b}{a^1\times b^1}=\frac{2,1\times 6,4}{2,45\times 6,75}мм.$$

При этом сечение активного проводника и окончательную плотность тока найдем по (27):

$$q_а=3(2,1\times 6,4-0,2)=39,6\ мм^2\ ;$$

$$j_а=\frac{793}{6\,.\,39,6}=3,34\ а/мм^2\ .$$

Размеры активного проводника без витковой изоляции определим по рис. 3d и таблице 5a:

$$b_о=b^1=6,75\ мм;\ h_о=3\,.\,a^1=3\,.\,2,45=7,35\ мм.$$

Окончательные размеры паза найдем по (25) и (25a) с помощью таблицы 6:

$$b_п=4+6,75+0,6=11,35\approx 11,5\ мм;$$

$$h_п=11,6+8\,.\,7,35+0,4+0,3\,.\,11,5\approx 74,25\approx 74\ мм.$$

При этом имеем:

$$\frac{h_п}{b_п}=\frac{74}{11,5}=6,43,$$

что соответствует (23a).

По (28) и (28a) вычисляем перепад температуры в пазовой изоляции:

$$\vartheta_i = \frac{0,039 \,.\, 1060 \,.\, 3,34 \,.\, 4}{74+11,5-3,5} \approx 6,7^\circ \approx 7 \text{ Ц};$$

$$\vartheta_{imax} = 0,03 \,.\, 3,34^2 \,.\, 6,4 \,.\, 4 \approx 8,6 \approx 9^\circ\text{Ц}.$$

§ 7. Полезный магнитный поток одного полюса при холостом ходе и при номинальной нагрузке

Полезный магнитный поток одного полюса генератора, двигателя или синхронного компенсатора при холостом ходе с номинальным напряжением равен:

$$\Phi_0 = \frac{E_{\text{фо}} \,.\, 10^8}{4,44 \,.\, f \,.\, w \,.\, f_w} \,. \tag{29}$$

Обычно (но не всегда) обмотки статора соединяются звездою.

В этом случае:

$$E_{\text{фо}} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \,. \tag{29а}$$

При соединении фаз треугольником имеем:

$$E_{\text{фо}} = U_N. \tag{29в}$$

При частоте f=50 *герц* из (29) получаем:

$$\Phi_0 = 0,45 \,.\, 10^6 \,.\, \frac{E_{\text{фо}}}{wf_w} = 0,45 \,.\, 10^6 \,.\, e_w, \tag{30}$$

где e_w=э.д.с., приходящаяся на один действующий виток обмотки статора.

Полезный магнитный поток одного полюса при номинальной нагрузке, на который должен быть рассчитан магнитопровод машины, предварительно найдем по формуле:

$$\Phi_N = \kappa_N \Phi_0. \tag{31}$$

Значение κ_N можно принять:

для двигателя — 1,06

для генератора — 1,08

для синхронного компенсатора — 1,18.

Пример 1. С помощью (30), (31) и данных § 5 находим:

$$\Phi_0 = 0,45 \,.\, 10^6 \frac{400}{\sqrt{3} \,.\, 63 \,.\, 0,89} = 1,86 \,.\, 10^6.$$

$$\Phi_N = 1{,}08 \cdot 1{,}86 \cdot 10^6 = 2 \cdot 10^6.$$

Пример 2. Из (30) и (31) с помощью данных § 5 получаем:

$$\Phi_o = 0{,}45 \cdot 10^6 \frac{13800}{\sqrt{3} \cdot 80 \cdot 0{,}917} = 0{,}45 \cdot 10^6 \cdot 108{,}5 = 48{,}8 \cdot 10^6.$$

$$\Phi_N = 1{,}08 \cdot 48{,}8 \cdot 10^6 = 52{,}7 \cdot 10^6.$$

Пример 3. С помощью (30), (31) и данных в § 5 находим:

$$\Phi_o = 0{,}45 \cdot 10^6 \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 16 \cdot 0{,}915} = 7{,}1 \cdot 10^6$$

$$\Phi_N = 1{,}08 \cdot 7{,}1 \cdot 10^6 = 7{,}66 \cdot 10^6.$$

§ 8. Определение числа пакетов и окончательной длины статора

Ширину пакетов b_{ps} сердечника статора (рис. 6) следует брать 4,5 или 4 (3,5) *см*, в зависимости от величины тепловой нагрузки обмотки статора (величины $AS \cdot j_a$) и активной стали, избегая, по возможности, промежуточных значений b_{ps}. Ширину радиальных вентиляционных каналов b_r (рис. 6) всегда следует принимать равной 1 *см*.

В длинных машинах для лучшего охлаждения центральной части статора нередко применяют пакеты различной толщины – от 6 *см* на концах статора до 3÷3,5 *см* в середине его.

Между полной длиной статора l_t, числом пакетов n_{ps}, их шириной b_{ps} и числом вентиляционных каналов n_r существуют следующие соотношения:

$$n_{ps} = n_r + 1 \text{ и } n_r = n_{ps} - 1. \quad (32)$$

Длина статора l_t при заданных значениях n_{ps} и b_{ps}:

$$l_t = n_{ps} b_{ps} + n_r b_r = n_{ps}(b_{ps} + 1) - 1 \text{ см}. \quad (32а)$$

Число пакетов n_{ps} при заданных значениях l_t и b_{ps}:

$$n_{ps} = \frac{l_t + 1}{b_{ps} + 1}. \quad (32в)$$

Ширина пакета b_{ps} при заданных значениях l_t и n_{ps}:

$$b_{ps}=\frac{l_t+1-n_{ps}}{n_{ps}}\,(см). \qquad (32c)$$

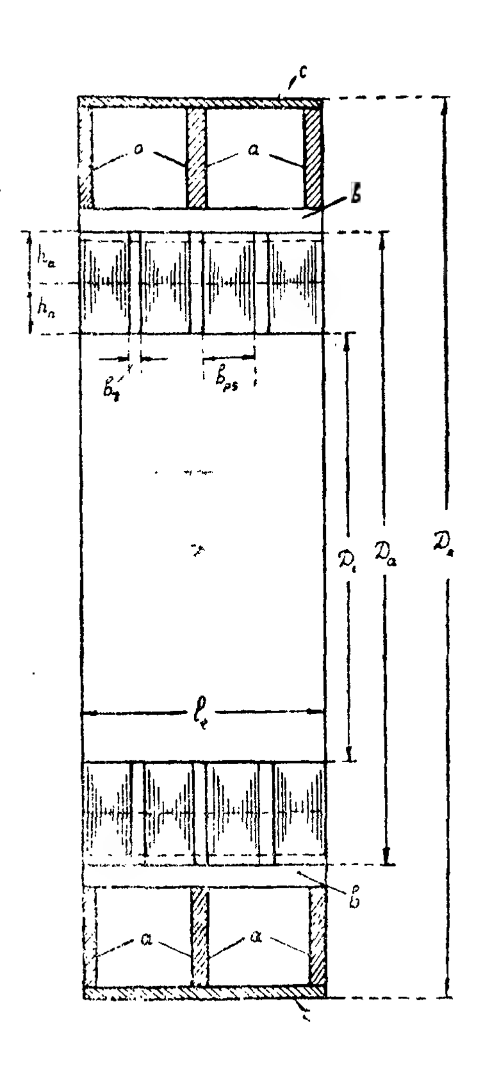


Рис. 6. Размеры сердечника и корпуса статора

Суммарная длина пакетов l:

$$l = l_t - n_r b_r = l_t - n_r \quad (см). \tag{32d}$$

Средняя ширина зубца z_m (рис. 7) равна:

$$z_m = \frac{\pi(D_i + h_n)}{Z} - b_n. \tag{33}$$

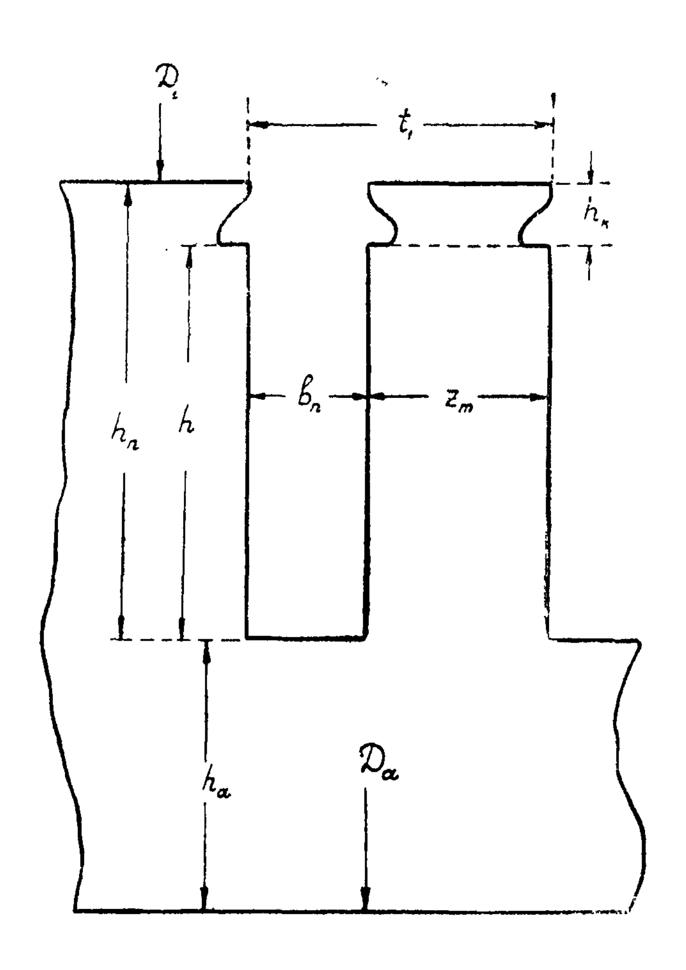


Рис. 7. Размеры паза, зубца и спинки статора

Допустимая индукция $B_{\delta N}$ в воздушном промежутке при номинальной нагрузке, а следовательно, и длина статора l_t,

определяются допустимой величиной средней индукции B_{zmN} в зубцах статора, которая должна быть $<18\,000 \div 18\,500$ *гс* в больших и средних машинах, и может доходить до $12\,000 \div 15\,000$ *гс* в малых машинах.

Связь между индукциями B_δ и B_{zm} можно установить, написав выражение для потока одного зубца:

$$\Phi_z = B_\delta \cdot l_t t_1 = B_{zm} \cdot 0{,}93 \cdot n_{ps} \cdot b_{ps} z_m \qquad (33а)$$

Здесь: 0,93 — коэффициент заполнения пакета чистой сталью.

Из (33а) находим:

$$\frac{B_{zm}}{B_\delta} = \frac{l_t t_1}{0{,}93 \cdot n_{ps} \cdot b_{ps} \cdot z_m} = k_{sm}, \qquad (33в)$$

где k_{sm} — коэффициент уплотнения (увеличения) индукции при переходе магнитного потока из воздушного промежутка (точнее — из поверхности полюсного наконечника) в среднее сечение зубца.

Из (33в) получаем:

$$B_{zmN} = k_{sm} B_{\delta N} \qquad (34)$$

и

$$B_{\delta N} = \frac{B_{zmN}}{k_{sm}} \,. \qquad (34а)$$

На основании изложенного получаем следующий порядок определения числа пакетов и окончательной длины статора.

По (33) находим среднюю ширину зубца статора z_m по данным § 6. Задаёмся шириной пакета b_{ps} в пределах $4{,}5 \div 4 \div (3{,}5)$ и, зная предварительную длину стали статора l_t (§ 2), находим по (32в) число пакетов статора n_{ps}, округляя полученный результат до ближайшего целого числа. Установив таким образом число пакетов статора, вычисляем по (32с) уточненную толщину пакетов и по (33в) находим коэффициент уплотнения k_{sm}.

Далее проверяем по (34) среднюю индукцию в зубцах B_{zmN} для принятой в § 2 индукции в воздухе $B_{\delta N}$.

Если величина B_{zmN} окажется в указанных ранее пределах, то намеченные значения l_t, n_{ps} и b_{ps} можно принять, как окончательные. Если же величина B_{zmN} окажется выше или ниже указанных ранее значений, то нужно соответственно увеличить или уменьшить длину статора, округлив её до удобного

размера, а в некоторых случаях — уменшить или увеличить ширину паза.

Установив окончательную длину статора, находим поперечное сечение воздушного промежутка

$$Q_\delta = 0{,}7 \,.\, \tau \,.\, l_t \; см^2 \tag{35}$$

и окончательно проверяем индукции в воздухе и в зубцах статора при холостом ходе и при номинальной нагрузке по данным § 7:

$$B_{\delta\, o} = \frac{\Phi_o}{Q_\delta} \tag{36}$$

$$\left.\begin{aligned} B_{\delta N} &= \frac{\Phi_N}{Q_\delta} \\ B_{zmN} &= \kappa_{sm} \,.\, B_{\delta N} \end{aligned}\right\} . \tag{37}$$

В заключение находим окончательную величину машинной постоянной:

$$C = \frac{D_i^2 l_t n_N}{P_N} \;. \tag{38}$$

Пример 1. По (33) находим среднюю ширину зубца:

$$z_m = \frac{(45+5{,}2)}{54} - 1{,}05 = 1{,}87 \; см.$$

Приняв предварительно толщину пакетов $b_{ps} = 4$ *см*, находим по (32в) число пакетов:

$$n_{ps} = \frac{18+1}{4+1} = 3{,}8 \approx 4.$$

При этом толщину пакетов и коэффициент уплотнения определим по (32с) и (33):

$$b_{ps} = \frac{18+1-4}{4} = 3,\ 75 \; см.$$

$$\kappa_{sm} = \frac{18 \,.\, 2{,}62}{0{,}93 \,.\, 4 \,.\, 3{,}75 \,.\, 1{,}87} = 1{,}80.$$

По (34) проверяем индукцию в зубцах статора при принятой в § 2 индукции в воздухе:

$$B_{zmN} = 1{,}8 \,.\, 6900 = 12\,400.$$

Как видим, для нашей небольшой машины результат удовлетворительный, а потому найденные выше значения l_t, n_{ps} и b_{ps} принимаем, как окончательные.

С помощью (35), (36), (37) и (38) находим:

$$Q\delta = 0,7 \cdot 23,6 \cdot 18 = 297 \ см^2;$$

$$B\delta_o = \frac{1,86 \cdot 10^6}{297} = 6250;$$

$$B\delta_N = \frac{2 \cdot 10^6}{297} = 6730;$$

$$B_{zmN} = 1,80 \cdot 6730 = 12\,200;$$

$$C = \frac{45^2 \cdot 18 \cdot 1000}{80} = 45,6 \cdot 10^4.$$

Пример 2. Определяем по (33) среднюю ширину зубца статора:

$$z_m = \frac{\pi(960 + 18,4)}{480} - 2,50 = 3,90 \ см.$$

Принимая предварительно толщину пакетов $b_{ps} = 4,5$ *см*, находим по (32в) число пакетов:

$$n_{ps} = \frac{200 + 1}{4,5 + 1} = 36,5 \approx 36.$$

Ввиду незначительного округления числа пакетов, оставляем толщину их равной 4,5 *см*. Тогда окончательная длина статора и коэффициент уплотнения по (32а) и (33в):

$$l_t = 36(4,5 + 1) - 1 = 197 \ см.$$

$$\kappa_{sm} = \frac{197 \cdot 6,28}{0,93 \cdot 36 \cdot 4,5 \cdot 3,90} = 2,10.$$

По (35), (36), (37) и (38) находим:

$$Q\delta = 0,7 \cdot 44,4 \cdot 197 = 6100 \ см^2;$$

$$B\delta_o = \frac{48,8 \cdot 10^6}{6100} = 8000;$$

$$B\delta_N = \frac{52,7 \cdot 10^6}{6100} = 8630;$$

$$B_{mzN}=2{,}10\,.\,8630=18200;$$

$$C=\frac{960^2\,.\,197\,.\,88{,}2}{90\,.\,000}=17{,}8\,.\,10^4.$$

Пример 3. По (33) находим среднюю ширину зубца:

$$z_m=\frac{(62{,}5+7{,}4)}{72}-1{,}15=1{,}90\ см.$$

Приняв предварительную толщину пакетов $b_{ps}=4$ *см*, находим по (32в) число пакетов:

$$n_{ps}=\frac{46{,}5+1}{4+1}=9{,}5\approx 10.$$

Округлив число пакетов, находим по (32с) их толщину, а по (33) — коэффициент уплотнения:

$$b_{ps}=\frac{46{,}5+1-10}{10}=3{,}75\ см;$$

$$K_{sm}=\frac{46{,}5\,.\,2{,}73}{0{,}93\,.\,10\,.\,3{,}75\,.\,1{,}90}=1{,}92.$$

По (34) проверяем среднюю индукцию в зубцах при индукции в воздухе, принятой в § 2 и равной $B_{\delta N}=7200$:

$$B_{zmN}=1{,}92\,.\,7200=13800.$$

Эта индукция не превышает допустимой величины, а потому примем найденные выше значения l_t, b_{ps} и n_{ps} как окончательные. Заметим, что имеется возможность повысить индукцию в зубцах и, следовательно, несколько уменьшить длину статора, однако мы не воспользуемся этой возможностью, чтобы получить пониженные перегревы статора.

По (35), (36), (37) и (38) находим:

$$Q_\delta=0{,}7\,.\,32{,}7\,.\,46{,}5=1065\ см^2;$$

$$B_{\delta o}=\frac{7{,}1\,.\,10^6}{1065}=6650;$$

$$B_{\delta N}=\frac{7{,}66\,.\,10^6}{1065}=7180;$$

$$B_{zmN}=1{,}92\,.\,7180=13800;$$

$$C=\frac{62{,}5^2\,.\,46{,}5\,.\,1000}{550}=33\,.\,10^4.$$

§ 9. Высота спинки и наружный диаметр сердечника и корпуса статора

Высоту спинки (сердечника) статора h_a (рис. 7) определим из уравнения:

$$\Phi_N = 2h_a \cdot 0{,}93 \cdot n_{ps} b_{ps} \cdot B_a, \quad (39)$$

откуда:

$$h_a = \frac{\Phi_N}{2 \cdot 0{,}93 \cdot n_{ps} b_{ps} \cdot B_a} (\text{см}) \quad (40)$$

Индукцию в спинке статора следует брать в пределах $B_a = 12000 \div 13500(14500)$ *гс*.

Определив по (40) h_a, находим внешний диаметр сердечника статора D_a (рис. 6), округляя результат до удобного или до ближайшего стандартного (серийного) диаметра, преимущественно в большую сторону, чтобы скомпенсировать уменьшение сечения спинки ласточкиными пазами:

$$D_a \approx D_i + 2h_n + 2h_a \ (\text{см}). \quad (40а)$$

Затем находим окончательную высоту спинки, вычисляем её двойное поперечное сечение $2Q_a$ и проверяем индукцию B_a:

$$h_a = \frac{D_a - D_i - 2h_n}{2} (\text{см}), \quad (41)$$

$$2Q_a = 2h_a \cdot 0{,}93 \cdot n_{ps} \cdot b_{ps} \ (\text{см}^2), \quad (42)$$

$$B_a = \frac{\Phi_N}{2Q_a}. \quad (43)$$

Основные конструктивные размеры и данные корпуса статора можно определить до разработки конструкции по следующим приближенным формулам.

Наружный диаметр корпуса статора D_k (рис. 6): для машин с горизонтальным валом [см. приложение 2]:

$$D_k \approx 1{,}19 D_a + 23 \ (\text{см}); \quad (44)$$

для машин с вертикальным валом [см. приложение 2]:

$$D_k \approx 1{,}10 D_a + 40 \ (\text{см}). \quad (45)$$

Количество N_k дисков (рёбер жесткости) a (рис. 6) равно, с округлением до ближайшего целого числа [см. прилож. 2]:

$$N_k \approx 0{,}020 \,.\, l_t + 2. \qquad (46)$$

Толщина дисков [см. прилож. 2]:

$$\Delta \approx \frac{2{,}5 + 0{,}11 \,.\, l_t}{N_k} \ (см) \qquad (47)$$

с округлением до ближайшего размера из следующего нормального сортамента толщин листов: 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0; 3,4; 3,6; 3,8; 4,0; 4,2; 4,5; 5,0.

Пример 1. По (40) и (40а) находим:

$$h_a = \frac{2 \,.\, 10^6}{2 \,.\, 0{,}93 \,.\, 4 \,.\, 3{,}75 \,.\, 12000} \cong 6 \ см.$$

$$D_a = 45 + 2 \,.\, 5{,}2 + 2 \,.\, 6 = 67{,}4 \approx 68 \ см.$$

Далее по (41), (42) и (43) получаем:

$$h_a = \frac{68 - 45 - 2 \,.\, 5{,}2}{2} = 6{,}3 \ см.$$

$$2Q_a = 2 \,.\, 6{,}30 \,.\, 0{,}93 \,.\, 4 \,.\, 3{,}75 = 176 \ см^2 .$$

$$B_a = \frac{2 \,.\, 10^6}{176} = 11400 \ гс.$$

По приближенным формулам (44), (46) и (47) находим предварительные конструктивные данные корпуса статора:

$$D_k = 1{,}19 \,.\, 68 + 23 = 104 \ см.$$

$$N_k \cong 0{,}02 \,.\, 18 + 2 = 2{,}36 \approx 2.$$

$$\Delta = \frac{2{,}5 + 0{,}11 \,.\, 18}{2} = 2{,}25 \approx 2{,}4 \ см.$$

Пример 2. По (40) и (40а) находим:

$$h_a = \frac{52{,}7 \,.\, 10^6}{2 \,.\, 0{,}93 \,.\, 36 \,.\, 4{,}5 \,.\, 13000} = 13{,}4 \ см.$$

$$D_a = 960 + 2 \,.\, 18{,}4 + 2 \,.\, 13{,}4 = 1023{,}6 \approx 1024 \ см,$$

Далее, по (41), (42) и (43) получаем:

$$h_a = \frac{1024-960-2 \cdot 18,4}{2} = 13,6 \text{ см.}$$

$$2Q_a = 2 \cdot 13,6 \cdot 0,93 \cdot 36 \cdot 4,5 = 4100 \text{ см}^2.$$

$$B_a = \frac{52,7 \cdot 10^6}{4100} = 12850 \text{ гс.}$$

По приближенным формулам (45), (46) и (47) находим предварительные конструктивные данные корпуса статора:

$$D_k = 1,10 \cdot 1024 + 40 \cong 1166 \text{ см.}$$

$$N_k \cong 0,020 \cdot 197 + 2 = 5,95 \approx 6.$$

$$\Delta = \frac{2,5+0,11 \cdot 197}{6} = 4,03 \text{ см} \approx 4 \text{ см.}$$

Пример 3. По (40) и (40а) находим:

$$h_a = \frac{7,66 \cdot 10^6}{2 \cdot 0,93 \cdot 10 \cdot 3,75 \cdot 13000} \approx 8,5 \text{ см.}$$

$$D_a = 62,5 + 2 \cdot 7,4 + 2 \cdot 8,5 = 94,3 \approx 94 \text{ см.}$$

Далее, по (41), (42) и (43) получаем:

$$h_a = \frac{94-62,5-2 \cdot 7,4}{2} = 8,35 \text{ см.}$$

$$2Q_a = 2 \cdot 8,35 \cdot 0,93 \cdot 10 \cdot 3,75 = 583 \text{ см}^2.$$

$$B_a = \frac{7,66 \cdot 10^6}{583} = 13100 \text{ гс.}$$

По приближенным формулам (44), (46) и (47) находим предварительные конструктивные данные корпуса статора:

$$D_k = 1,19 \cdot 94 + 23 = 135 \text{ см.}$$

$$N_k = 0,020 \cdot 46,5 + 2 = 2,93 \approx 3,$$

$$\Delta \approx \frac{2,5+0,11 \cdot 46,5}{3} = 2,53 \cong 2,6 \text{ см.}$$

§ 10. Вес стали зубцов и спинки статора

Вес зубцов (рис. 6, 7 и § 3):

$$G_z = Z \cdot z_m \cdot h_n \cdot n_{ps} \cdot b_{ps} \cdot 0,93 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг.} \quad (48)$$

Вес спинки статора:

$$G_a = \pi \cdot (D_a - h_a) h_a \cdot n_{ps} \cdot b_{fs} \cdot 0{,}93 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ кг.} \qquad (49)$$

Пример 1. По (48) и (49) находим:

$$G_z = 54 \cdot 1{,}87 \cdot 5{,}2 \cdot 4 \cdot 3{,}75 \cdot 0{,}93 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 57 \text{ кг.}$$

$$G_a = \pi \cdot (68 - 6{,}3) 6{,}3 \cdot 4 \cdot 3{,}75 \cdot 0{,}93 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 132 \text{ кг.}$$

Пример 2. По (48) и (49) находим:

$$G_z = 480 \cdot 3{,}9 \cdot 18{,}4 \cdot 36 \cdot 4{,}5 \cdot 0{,}93 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 40500 \text{ кг.}$$

$$G_a = \pi \cdot (1024 - 13{,}6) 13{,}6 \cdot 36 \cdot 4{,}5 \cdot 0{,}93 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 50500 \text{ кг.}$$

Пример 3.

$$G_z = 72 \cdot 1{,}9 \cdot 7{,}4 \cdot 10 \cdot 3{,}75 \cdot 0{,}93 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 275 \text{ кг.}$$

$$G_a = \pi \cdot (94 - 8{,}35) 8{,}35 \cdot 10 \cdot 3{,}75 \cdot 0{,}93 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 613 \text{ кг.}$$

§ 11. Активное сопротивление и вес меди обмотки статора

В предварительном расчете среднюю длину витка обмотки статора можно найти по формулам:

при петлевой обмотке

$$l_a \approx 2[l_t + 1{,}4\tau\beta + (2 \div 7)] \text{ см;} \qquad (50)$$

при волновой обмотке:

$$l_a \approx 2[l_t + 1{,}4\tau + (2 \div 7)] \text{ см.} \qquad (50а)$$

Здесь:

τ — полюсное деление в см;

β — сокращение шага петлевой обмотки;

$(2 \div 7)$ *см* — прибавки на прямолинейную часть лобовых соединений, причем берется;

2 *см* — для низковольтных машин;

7 *см* — для высоковольтных машин.

Полная длина обмотки статора:

$$L_a = Z \frac{S_n}{2} l_a \text{ (см).} \qquad (51)$$

Вес меди обмотки статора (§ 6):

$$G_{cu1} = L_a \cdot q_a \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} \text{ кг.} \qquad (51а)$$

Омическое сопротивление одной фазы обмотки при 75°Ц (§ 6):

$$R_{a75}=\frac{1,24\,.\,L_a}{3\,.\,5700\,.\,q_a\,.\,a^2}\ см. \quad (52)$$

Коэффициент вихревых токов для пазовой части обмотки:

$$k_f=1+0,427\left(\frac{f}{100}\cdot\frac{b}{b_п}\,.\,s_п\,.\,c\right)^2 a^4<1,20\div1,25. \quad (52a)$$

Здесь:

f — частота тока;

$s_п$ — число активных проводников в пазу;

c — число элементарных проводников в одном активном проводнике (§ 6);

a и b — высота и ширина одного элементарного проводника в *см*;

$b_п$ — ширина паза в *см*.

Активное сопротивление одной фазы обмотки при 75°Ц:

$$R_{eff75}\approx R_{a75}\left[1+\frac{2n_{ps}b_{ps}}{l_a}(k_f-1)\right] ом. \quad (53)$$

То же сопротивление в относительных единицах, т. е в долях сопротивления $\frac{U_ф}{I_N}$:

$$R^1_{eff75}=R_{eff75}\cdot\frac{\sqrt{3}\,I_N}{U_N}=r_a \text{ (долей единицы)}. \quad (53a)$$

Пример 1. По (50) ... (53а) находим:

$$l_a=2[18+1,4\,.\,0,78\,.\,23,6+3]=94\ см.$$

$$L_a=54\frac{14}{2}94=35500\ см.$$

$$G_{cu1}=35500\,.\,2,26\,.\,5,5\,.\,8,9\,.\,10^{-5}=39\ кг.$$

$$R_{a75}=\frac{1,24\,.\,35500}{3\,.\,5700\,.\,2,26\,.\,5,5\,.\,4}=0,052\ ома.$$

$$k_f=1+0,427\left(\frac{50\,.\,1\,.\,14\,.\,0,55}{100\,.\,1,05}\right)^2.\ 0,226^4=1,015.$$

$$R_{eff75}=0{,}052\left[1+\frac{2\ .\ 4\ .\ 3{,}75\ .\ 0{,}015}{94}\right]=0{,}0522\ \textit{ома}.$$

$$R'_{eff75}=0{,}0522\frac{\sqrt{3}\ .\ 115}{400}=0{,}0261\ \partial/e\partial.\ (2{,}61\%).$$

Пример 2. По (50)... (53a) находим:

$$l_a=2[197+1{,}4\ .\ 44{,}4+7]=532\ \textit{см}.$$

$$L_a=480\cdot\frac{2}{2}532=255000\ \textit{см}.$$

$$G_{cu1}=255000\ .\ 710\ .\ 8{,}9\ .\ 10^{-5}=16100\ \textit{кг}.$$

$$R_{a75}=\frac{1{,}24\ .\ 255000}{5700\ .\ 3\ .\ 710\ .\ 2^2}=0{,}0065\ \textit{ом}.$$

$$k_f=1+0{,}427\left(\frac{50}{100}\cdot\frac{0{,}59}{2{,}5}\cdot 2\ .\ 50\right)^2.\ 0{,}244^4=1{,}21$$

$$R_{eff75}=0{,}0065\left[1+\frac{2\ .\ 36\ .\ 4{,}5}{532}(1{,}21-1)\right]=0{,}0076\ \textit{ом}.$$

$$R'_{eff75}=0{,}0076\frac{\sqrt{3}\ .\ 3770}{13800}=0{,}0036\ \partial/e\partial.\ (0{,}36\%).$$

Пример 3. По (50) ... (53a) находим:

$$l_a=2[46{,}5+1{,}4\ .\ 32{,}7\ .\ 0{,}833+3]=175\ \textit{см}.$$

$$L_a=72\ .\frac{8}{2}.175=50300\ \textit{см}.$$

$$G_{cu1}=50300\ .\ 39{,}6\ .\ 8{,}9\ .\ 10^{-5}=177\ \textit{кг}.$$

$$R_{a75}=\frac{1{,}24\ .\ 50300}{3\ .\ 5700\ .\ 39{,}6\ .\ 6^2}=0{,}00255\ \textit{ом}.$$

$$k_f=1+0{,}427\left(\frac{50}{100}\cdot\frac{0{,}64}{1{,}15}\ 8\ .\ 3\right)^2.\ 0{,}21^4=1{,}037.$$

$$R_{eff75}=0{,}00255\left[1+\frac{2\ .\ 10\ .\ 3{,}75}{175}0{,}037\right]=0{,}00259\ \textit{ом}.$$

$$R'_{eff75}=0{,}00259\frac{\sqrt{3}\ .\ 793}{400}=r_a=0{,}0089\ \partial/e\partial.\ (0{,}89\%).$$

§ 12. Воздушный зазор

Величина зазора δ под срединой полюса определяется двумя факторами.

1. Производственно-монтажными и эксплоатационными соображениями, которые требуют, чтобы воздушный промежуток удовлетворял, по возможности, следующим соотношениям [Л. 2]:

$$\left.\begin{aligned} \delta &\geqslant 0{,}15(1+D_i^2 \cdot 10^{-5})\ \text{см при } D_i < 1000\ \text{см} \\ \delta &\geqslant 0{,}15(1+D_i \cdot 10^{-2})\ \text{см при } D_i \geqslant 1000\ \text{см} \end{aligned}\right\} . \qquad (54)$$

2. Заданной величиной *ОКЗ* (отношение короткого замыкания), от которой зависят статическая перегружаемость и динамическая устойчивость синхронной машины и которая требует, чтобы (см. приложение 2):

$$\delta \geqslant ОКЗ \frac{K_o \cdot f_w \cdot \tau \cdot AS}{B_{\delta o}} . \qquad (55)$$

Здесь:

B_{δ_0} — индукция в зазоре при холостом ходе (§ 8);

$K_o = 0{,}35 \div 0{,}4$ для больших машин;

$K_o = 0{,}25 \div 0{,}30$ для малых машин (у которых коэффициент зубчатости k_δ (§ 13) и коэффициент насыщения (§ 17) имеют повышенные значения).

В качестве предварительной величины δ принимаем большее из двух значений, полученных по (54) и (55). Величина δ будет уточнена в § 13 после расчета реактивных сопротивлений и проверки заданной величины *ОКЗ*.

Поверхность полюсного наконечника, обращенная к статору, очерчивается окружностью радиуса R_p (см. § 14), причем воздушный зазор по краям полюса обычно принимается в 1,5 раза больше, т. е.

$$\delta_{max} = 1{,}5\ \delta. \qquad (56)$$

В заводской практике, вследствие использования имеющихся полюсных штампов, допускаются значения δ_{max}, находящиеся в пределах $\delta_{max} = (1 \div 2)\ \delta$.

Расчетный воздушный промежуток [Л. 9]:

$$\delta^1 = \delta + \tfrac{1}{3}(\delta_{max} - \delta) . \qquad (57)$$

Пример 1. По (54) ... (57) находим:

$$\delta \geqslant 0,15(1+45^2 \cdot 10^{-5})=0,153 \text{ см}.$$

$$\delta \geqslant 1 \frac{0,3 \cdot 0,89 \cdot 23,6 \cdot 308}{6250}=0,31 \text{ см}.$$

Примем $\delta=0,3$ *см*.

При этом получаем:

$$\delta_{max}=1,5 \cdot 0,3=0,45 \text{ см}.$$

$$\delta^1=1,17 \cdot 0,3=0,35 \text{ см}.$$

Пример 2. По (54) ... (57) находим:

$$\delta \geqslant 0,15(1+960^2 \cdot 10^{-5})=1,53 \text{ см}.$$

$$\delta \geqslant 1,5 \frac{0,4 \cdot 0,917 \cdot 44,4 \cdot 600}{8000}=1,83 \text{ см}.$$

Принимаем: $\delta=1,8$ *см*; $\delta_{max}=1,5 \cdot 1,8=2,7$ *см*.

Расчетный воздушный промежуток:

$$\delta \approx 1,17 \cdot 1,8=2,1 \text{ см}.$$

Пример 3. По (54) ... (57) находим:

$$\delta \geqslant 0,15(1+62,5^2 \cdot 10^{-5})=0,156 \text{ см}.$$

$$\delta \geqslant 1 \frac{0,3 \cdot 0,915 \cdot 32,7 \cdot 387}{6650}=0,522 \text{ см}.$$

Примем $\delta=0,55$ *см*.

$$\delta_{max}=1,5 \cdot 0,55=0,82 \text{ см}.$$

$$\delta=1,17 \cdot 0,55=0,64 \text{ см}.$$

§ 13. Реактивное сопротивление обмотки статора

Ампервитки намагничивания воздушного промежутка при холостом ходе с номинальным напряжением (на пару полюсов [Л. 9]:

$$AW_{\delta o}=1,6\delta' k_\delta \overline{B}_{\delta o}. \qquad (58)$$

Здесь:

$B_{\delta o}$ — по (36) § 8.

δ^1 — по (57) § 12.

k_δ — коэффициент зубчатости статора, равный:

$$k_\delta=\frac{t_1+10\delta^1}{(t_1-b_п)+10\delta^1} \times \frac{(b_{ps}+1)+10\delta^1}{b_{ps}+10\delta^1}. \qquad (58а)$$

Пиковое значение мдс обмотки статора по прямоугольной волне мдс (на пару полюсов) [Л. 9.]:

$$A W_A = 2{,}12 \frac{f_w w I_ф}{p} = 0{,}71 f_w \, . \, \tau \, . \, AS. \quad (59)$$

Реактивность рассеяния обмотки статора (для открытых пазов), без учёта полей рассеяния в расточке статора, в долях кажущегося сопротивления $Z_f = \frac{U_{фN}}{I_{фN}}$ [Л. 9]:

$$x_l = \frac{A W_A}{2\Phi_o f^2_\beta} \left[\frac{0{,}34 l_t h_n (3\beta + 1)}{q b_n} + 1{,}05\tau(3\beta - 1) \right] + \frac{0{,}156 A W_A}{q^2 A W_{\delta o}} . \quad (60)$$

Здесь:

f_β — обмоточный коэффициент сокращения (§ 5);

β — шаг обмотки в долях полюсного деления (§ 5).

Значения x_l обычно находятся в пределах 0,04 до 0,18 (0,20).

Полная реактивность рассеяния обмотки статора (с учетом полей рассеяния в расточке) [Л. 9]:

$$x^1_p = x_l + 0{,}053 \frac{A W_A}{A W_{\delta o}} . \quad (61)$$

Ампервитки продольной реакции якоря на пару полюсов:

$$A W_{ad} \approx 1{,}053 \, . \, A W_A . \quad (62)$$

Ампервитки короткого замыкания при номинальном токе статора:

$$A W_k = A W_{ad} + x_l \, . \, A W_{\delta o} = A W_A + x^1_p \, . \, A W_{\delta o}. \quad (63)$$

Определив $A W_{\delta o}$ и $A W_k$ по (58) и (63), производим предварительную проверку *ОКЗ* по формуле:

$$ОКЗ = \frac{A W_{to}}{A W_k} \approx \frac{1{,}15 \, . \, A W_{\delta o}}{A W_k} . \quad (64)$$

Если окажется, что полученная по (64) величина *ОКЗ* значительно отличается от заданной, то следует соответственно увеличить или уменьшить зазор δ и повторить вычисления параграфов 12 и 13. Уточненное значение *ОКЗ* будет получено только после расчета характеристики холостого хода в § 17.

Продольная реактивность реакции якоря в ∂/ed:

$$x_{ad} \approx 1{,}053 \frac{AW_A}{AW_{\delta o}} - \frac{AW_{ad}}{AW_{\delta o}}. \qquad (65)$$

Продольная синхронная реактивность:

$$x_d = x_l + x_{ad} - x^1_p + \frac{AW_A}{AW_{\delta o}}. \qquad (66)$$

Поперечная реактивность реакции якоря.

$$x_{aq} \approx 0{,}55 \frac{1 + \kappa_\delta}{2} x_{ad}. \qquad (67)$$

Поперечная синхронная реактивность:

$$x_q \approx x_l + x_{aq}. \qquad (68)$$

Определение динамических реактивностей и постоянных времени, необходимых для расчета переходных режимов синхронной машины, дано в приложении 1.

Пример 1. По (58) ...(68) находим:

$$\kappa_\delta = \frac{2{,}62 + 10 \cdot 0{,}35}{(2{,}62 - 1{,}05) + 10 \cdot 0{,}35} \times$$

$$\times \frac{(3{,}75 + 1) + 10 \cdot 0{,}35}{3{,}75 + 10 \cdot 0{,}35} \approx 1{,}37.$$

$$AW_{\delta o} = 1{,}6 \cdot 0{,}35 \cdot 1{,}37 \cdot 6250 = 4800.$$

$$AW_A = 0{,}71 \cdot 0{,}89 \cdot 23{,}6 \cdot 308 = 4580.$$

$$x_l = \frac{4580}{2 \cdot 1{,}86 \cdot 10^6 \cdot 0{,}939^2} \left[\frac{0{,}34 \cdot 18 \cdot 5{,}2(3 \cdot 0{,}78 + 1)}{3 \cdot 1{,}05} + \right.$$

$$\left. + 1{,}05 \cdot 23{,}6(3 \cdot 0{,}78 - 1) \right] - \frac{0{,}156 \cdot 4580}{3^2 \cdot 4800} \approx 0{,}106\ \partial/ed.$$

$$x^1_p = 0{,}106 + 0{,}053 \frac{4580}{4800} \approx 0{,}157$$

$$AW_{ad} = 1{,}053 \cdot 4580 = 4820.$$

$$AW_k = 4820 + 0{,}106 \cdot 4800 = 5330.$$

Предварительная проверка *ОКЗ*:

$$ОКЗ \approx 1{,}15 \frac{4800}{5330} \approx 1{,}03.$$

Совпадение с заданной величиной удовлетворительное, а потому намеченный зазор $\delta=0,3$ *см* изменять не требуется.

$$x_{ad}=1,053\frac{4580}{4800}=\frac{4820}{4800}\approx 1.$$

$$x_d=0,106+1=1,106$$

$$x_{aq}=0,55\frac{1+1,37}{2}\cdot 1=0,65$$

$$x_q=0,106+0,65\cong 0,76$$

Пример 2. По (58а) и (58) находим:

$$\kappa_\delta=\frac{6,28+10\,.\,2,1}{(6,28-2,5)+10\,.\,2,1}\times\frac{(4,5+1)+10\,.\,2,1}{4,5+10\,.\,2,1}=1,15$$

$$AW_{\delta o}=1,6\,.\,2,1\,.\,1,15\,.\,8000=31000.$$

По (59) и (60) получаем:

$$AW_A=2,12\frac{0,917\,.\,80\,.\,3770}{34}=0,71\,.\,0,917\,.\,44,4\,.\,600=17300.$$

$$x_l=\frac{17300}{2\,.\,48,8\,.\,10^6\,.\,0,965^2}\left[\frac{0,34\,.\,197\,.\,18,4(3\,.\,0,85+1)}{2^6/_{17}\,.\,2,5}+\right.$$

$$\left.+1,05\,.\,44,4(3\,.\,0,85-1)\right]+\frac{0,156\,.\,17300}{2,35^2\,.\,31000}=0,175\ \partial/e\partial.$$

Далее, по (61) . . . (68) находим:

$$x^1{}_p=0,175+0,05\frac{17300}{31000}=0,203\ \partial/e\partial.$$

$$AW_{ad}=1,05\,.\,17300=18200.$$

$$AW_k=18200+0,175\,.\,31000=23630.$$

$$OKZ\approx\frac{1,15\,.\,31000}{23630}\approx 1,5.$$

$$x_{ad}=\frac{18300}{31000}=0,59.$$

$$x_d=0,175+0,59=0,765.$$

$$x_{aq}=0{,}55\frac{1+1{,}15}{2}\cdot 0{,}59=0{,}35.$$

$$x_q=0{,}175+0{,}35=0{,}525\approx 0{,}53 \text{ } \partial/e\partial.$$

Пример 3. По (58) . . . (68) находим:

$$k_\delta=\frac{2{,}73+10\cdot 0{,}64}{2{,}73-1{,}15+10\cdot 0{,}64}\times\frac{(3{,}75+1)+10\cdot 0{,}64}{3{,}75+10\cdot 0{,}64}=1{,}26$$

$$AW_{\delta o}=1{,}6\cdot 0{,}64\cdot 1{,}26\cdot 6650=8600.$$

$$AW_A=2{,}12\frac{0{,}915\cdot 16\cdot 793}{3}=0{,}71\cdot 0{,}915\cdot 32{,}7\cdot 387=8200.$$

$$x_l=\frac{8200}{2\cdot 7{,}1\cdot 10^6\cdot 0{,}962^2}\left[\frac{0{,}34\cdot 46{,}5\cdot(3\cdot 0{,}833+1)}{4\cdot 1{,}15}+\right.$$

$$\left.+1{,}05\cdot 32{,}7(3\cdot 0{,}833-1)\right]+\frac{0{,}156\cdot 8200}{4^2\cdot 8600}=0{,}049 \text{ } \partial/e\partial.$$

$$x^1_p=0{,}049+0{,}053\frac{8200}{8600}=0{,}0995\approx 0{,}10 \text{ } \partial/e\partial.$$

$$AW_{ad}\cong 1{,}053\cdot 8200=8630.$$

$$AW_k=8630+0{,}049\cdot 8600=8200+0{,}10\cdot 8600=9055.$$

$$OK3\cong\frac{1{,}15\cdot 8600}{9055}=1{,}04.$$

Следовательно, зазор δ выбран правильно.

Вычисляем остальные статические реактивности:

$$x_{ad}\cong 1{,}053\frac{8200}{8600}=\frac{8630}{8600}=1{,}005\approx 1 \text{ } \partial/e\partial.$$

$$x_d=0{,}049+1=0{,}10+\frac{3200}{8600}\cong 1{,}05.$$

$$x_{aq}\cong 0{,}55\frac{1+1{,}26}{2}\cdot 1=0{,}62.$$

$$x_q=0{,}049+0{,}62=0{,}669\approx 0{,}67 \text{ } \partial/e\partial.$$

Определение динамических реактивностей и постоянных времени требует знания данных обмотки возбуждения, демпферной клетки и размеров полюса, а потому будет произведено в § 19.

§ 14. Размеры полюса и демпферной клетки

Обычно полюса изготовляются из листового железа толщиною 1 ÷ 1,5 *мм* и скрепляются с ободом посредством хвоста *n* (рис. 8) (молоткообразного или ласточкина), или с помощью

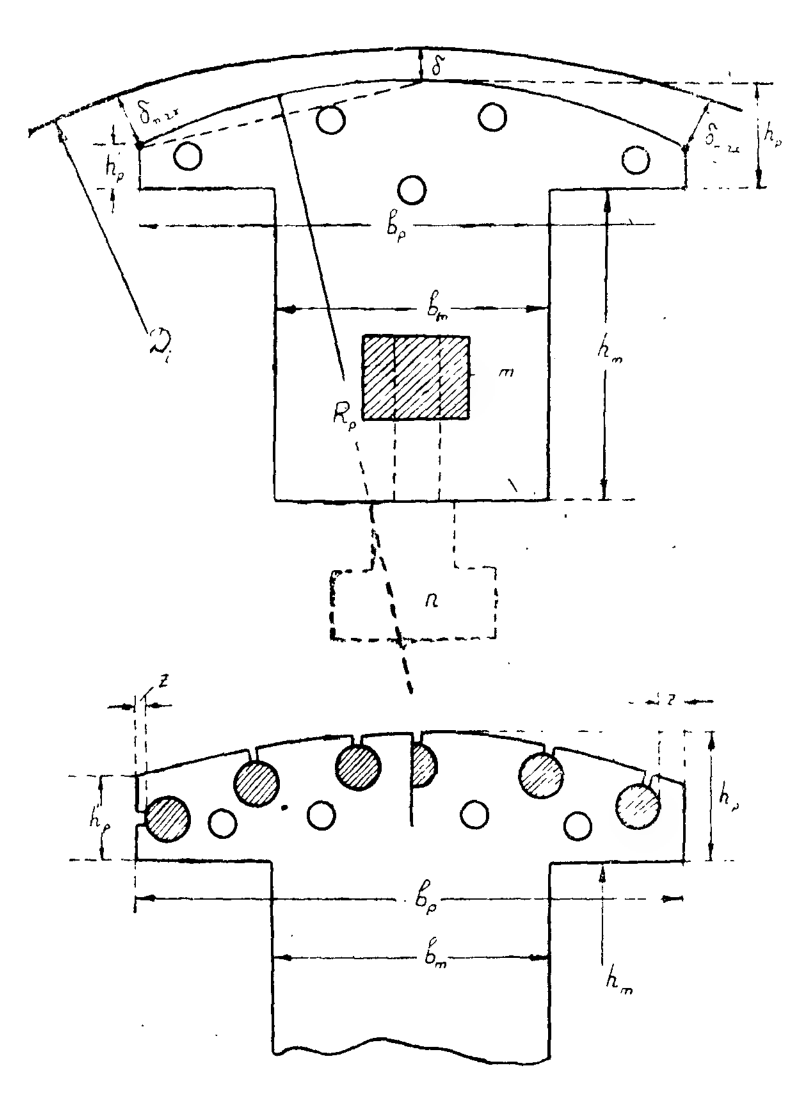


Рис. 8. Размеры полюса и расположение пазов демпферной клетки и заклепок

болтов, пропущенных через обод и ввернутых в сквозной железный брус *т* (рис. 8). Иногда прямоугольные сердечники полюсов делаются из стальных отливок (что увеличивает динамическую устойчивость машины) и крепятся к ободу (массивному или шихтованному) болтами [Л. 1, 15]; башмаки же в этих случаях, как правило, изготовляются из листового железа. В коротких машинах при $l_t < \tau$ часто применяются круглые массивные сердечники с листовыми башмаками прямоугольной формы.

В эскизных проектах размеры полюсов и демпферной клетки можно определять, руководствуясь следующими указаниями и обязательно сопровождая расчеты и з г о т о в л е н и е м м а с ш т а б н о г о э с к и з а п о л ю с а и части обода или втулки (рис. 8, 12, 13, 14).

Длину полюсного наконечника (башмака) l_p и длину полюсного сердечника l_m (рис. 9) можно принимать равной полной длине статора, т. е. полагать:

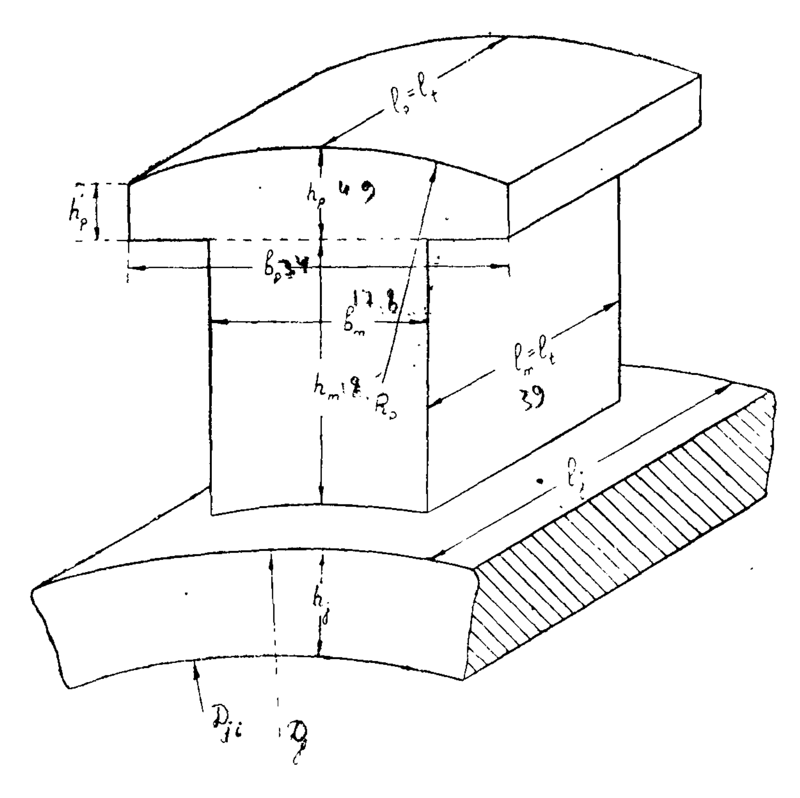


Рис. 9. Эскиз полюса и сердечника (ярма, обода) ротора.

$$l_p + l_m = l_t \ см,\qquad (69)$$

не занимаясь выяснением размеров щеки полюса, которые будут установлены при детальном проектировании.

При любом числе полюсов длину дуги полюса b'_p следует определять по формуле:

$$b'_p = \alpha\tau \approx 0{,}7\tau \ см,\qquad (69а)$$

округляя третью цифру до 5 или до 0. При $2p > 8$ хорду полюса b_p (рис. 8, 12, 13) можно считать равной дуге полюса.

При $2p < 8$ хорду полюса следует находить графически, как описано далее.

Радиус окружности R_p, которым очерчена дуга полюсного наконечника (рис. 8, 12, 13), определять или по формуле [Л. 9]:

$$R_p = \frac{D_i}{2 + \frac{8D_i(\delta_{max} - \delta)}{b^2_p}} \ см\ .\qquad (70)$$

или графически, как описано далее.

При выборе числа пазов демпферной клетки нужно соблюдать следующие требования [Л. 9]:

а) В генераторах для уменьшения добавочных потерь и искажения кривой эдс шаг t_2 пазов демпферной клетки, отнесённый к расточке статора, по возможности должен удовлетворять требованиям:

$$\left.\begin{array}{ll} \left.\begin{array}{l} 0{,}8t_1 < t_2 < 0{,}9t_1 \\ 1{,}1t_1 < t'_2 < 1{,}2t_1 \end{array}\right\} & \text{при } d < 4 \\ \text{или} & \\ t_2 \approx t_1 & \text{при } d > 5 \end{array}\right\}.\qquad (71)$$

Здесь:

t_1 — шаг зубцов статора,

d — знаменатель дробности в выражении для q (§ 3).

в) В двигателях для уменьшения добавочных потерь и исключения возможности „прилипания“ число n_2 пазов демпферной клетки и их шаг t_2 (отнесенный к расточке статора) должны по возможности удовлетворять требованиям:

$$\left.\begin{array}{l} t_2 > 0{,}8t_1 \\ (n_2 - 1)\left(1 - \frac{t_2}{t_1}\right) > 0{,}75 \end{array}\right\}.\qquad (71а)$$

Для двигателей и генераторов сечение стержня демпферной клетки q_b в $мм^2$ и его диаметр d_b в $см$ вычислять по формулам:

$$\left.\begin{aligned} q_b &= \frac{(0{,}2 \div 0{,}4) \cdot 3q \cdot s_n q_a}{n_2} \; мм^2 \\ d_b &= 0{,}113\sqrt{q_b} \; см \end{aligned}\right\} . \qquad (71в)$$

Здесь:

q_a — сечение активного проводника обмотки статора в $мм^2$ (§ 6);

s_n — число активных проводников в пазу статора (§§ 3 и 6);

Коэффициенты в формуле (71в) берутся:

0,2 — для генераторов,

0,4 — для двигателей.

Сечение короткозамыкающих колец демпферной клетки

$$q_R \approx 0{,}5 n_2 \cdot q_b \; мм^2. \qquad (71c)$$

Шаг паза t_2 демпферной клетки связан с полюсной дугой b'_p, с числом пазов n_2 и с диаметром стержней соотношением (рис. 8,13):

$$t_2 \approx \frac{b^1{}_p - d_b - 2z}{n_2 - 1} \; см, \qquad (71d)$$

где $z = (0{,}2 \div 0{,}8)$ $см$ — толщина наружной стенки паза (рис. 8).

Ширину прямоугольного шихтованного сердечника полюса b_m (рис. 8,12, 13, 14) определять по формуле:

$$b_m = \frac{\Phi_N \cdot \sigma_N}{0{,}95 \cdot l_m \cdot B_m} . \qquad (72)$$

Здесь:

B_m — индукция в основании полюса при номинальной нагрузке, равная 16500÷17500 (18000) $гс$;

$l_t = l_m$ — длина полюса в $см$;

0,95 — коэффициент заполнения;

Φ_N — полезный магнитный поток полюса при номинальной нагрузке (§ 7);

σ_N — коэффициент рассеяния при номинальной нагрузке.

Коэффициент рассеяния зависит от размеров полюса, которые еще не известны, и точное его значение можно получить только последующим поверочным расчётом после выбора размеров полюса. Поэтому в предварительных расчетах величину σ_N следует определять по приближенной формуле (см. приложение 2):

$$\sigma_N \approx 1 + \frac{10\delta}{\tau} \cdot \qquad (72a)$$

При определении радиальной высоты полюсного сердечника нужно различать два случая:

а) Машины с $2p < 8$. Для определения высоты сердечника h_m нужно изготовить масштабный эскиз ротора (рис. 12 или 13).

Для этого от точки a, расположенной на оси полюса Oa (рис. 12), откладываем вправо и влево отрезки ac и ab так, чтобы в выбранном нами масштабе:

$$ac = ab = 0{,}5b^1{}_p,$$

где $b^1{}_p$ — расчетная дуга полюса, по (69а).

При этом дуга bac будет практически равна расчетной дуге $b^1{}_p$; хорду bc, стягивающую полюсную дугу bac, примем за хорду полюса b_p.

Для нанесения на эскиз полюсного наконечника откладываем от точки a по радиусу отрезок $aa^1 = \delta$, а от точек b и c — отрезки $bb^1 = cc^1 = \delta_{max}$ и проводим через точки a^1, b^1 и c^1 окружность, центр которой расположится на оси полюса в точке o^1 и находится элементарным построением. Высоту полюсного наконечника h_p выбираем глазомерно так, чтобы соотношения размеров полюсного наконечника приблизительно соответствовали рис. 8 и 12. В машинах с демпферной клеткой (рис. 13) дугу полюса строим, как описано выше, для рис. 12; затем, соблюдая выбранный масштаб, размещаем пазы демпферной клетки, и глазомерно выбираем высоту h_p полюсного наконечника так, чтобы соотношения его размеров соответствовали рис. 8 и 13.

Вычислив по (72) размер b_m, вычерчиваем боковые грани полюсного сердечника в направлении от полюсного наконечника к центру ротора и наносим на эскиз в выбранном масштабе верхнюю концевую шайбу катушки, полагая её толщину $\delta_0 = 0{,}4 \div 0{,}8$ *см*, и изоляцию сердечника, полагая

её толщину $\Delta = 0{,}3 \div 0{,}4$ *см*. Далее отмечаем контур катушки kge (рис. 12 и 13), оставляя между соседними катушками окно для вентиляции и размещения междукатушечных распорок, причем ширина x этого окна равна:

$$x \geq (0{,}06 \div 0{,}07) \cdot \tau \text{ см.} \quad (73)$$

Наименьшая целесообразная толщина b_1 нижней части катушки (рис. 12 и 13) должна быть около:

$$b_1 \approx (0{,}25 \div 0{,}3) \cdot b_o. \quad (73а)$$

Таким образом, точка e пересечения линии ee с боковой гранью катушки ge определяет целесообразную высоту катушки. Причертив к ней нижнюю концевую шайбу δ_o, находим высоту полюса h_m, а следовательно, и поперечник D_j $2p$-гранной втулки ротора. Обычно D_j получается в пределах (0,4—0,6) D_i, в зависимости от величины b_m, которая обусловливается выбранной величиной индукции в воздухе $B_{\delta N}$.

в) Многополюсные машины. Для этих машин предварительную высоту полюсного наконечника h_p и высоту полюсного сердечника h_m следует определять по формулам (см. прилож. 2):

$$\left.\begin{aligned} &h_p \approx 0{,}3(b_p - b_m) && \text{для машин без демпферной клетки,} \\ &h_p \approx 0{,}3(b_p - b_m) + d_b && \text{для машин с демпферной клеткой,} \end{aligned}\right\} \quad (74)$$

$$h_m \approx 10{,}5\delta + 8 \text{ см.} \quad (74а)$$

Полученная по (74а) величина проверяется и окончательно устанавливается при расчете обмотки возбуждения (§ 19) с помощью масштабного эскиза, подобного рис. 14.

Определив размеры полюсов и демпферной клетки, вычисляем их вес:

Вес железа полюсов:

$$G_m \approx 2pl_t[h_m b_m + 0{,}8 h_p b_p] 0{,}95 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ кг.} \quad (75)$$

Вес стержней демпферной клетки:

$$G_b \approx 2pn_2 \cdot q_b[l_t + (7 - 12) \text{ см}] 8{,}9 \cdot 10^{-5} \text{ кг.} \quad (76)$$

Вес короткозамыкающих колец:

$$G_R = 2\pi \cdot (D_i - 2\delta - d_b) q_R \cdot 1{,}15 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} \text{ кг.} \quad (77)$$

Пример 1. По (69) и (69а) находим:

$$l_p \cong l_m = l_t = 18 \text{ см}.$$

По (72а) и (72) определяем:

$$\sigma_N \cong 1 + \frac{10 \cdot 0,3}{23,6} = 1,13;$$

$$b_m \cong \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 1,13}{0,95 \cdot 18 \cdot 17500} = 7,55 \cong 7,5 \text{ см}.$$

Сделав масштабный эскиз ротора по образцу рис. 12, находим из него:

$$h^1{}_p = 0,5 \text{см};\ h_p = 2 \text{ см};\ b_p \cong 16,5 \text{ см};$$

$$D_j = 18 \text{ см};\ h_m = 11,2 \text{ см}.$$

По (75) находим:

$$G_m \approx 6 \cdot 18(11,2 \cdot 7,5 + 0,8 \cdot 2 \cdot 16,5)0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} =$$
$$= 89,2 \approx 90 \text{ кг}.$$

Пример 2. По (69), (69а) и (70) находим:

$$l_p = l_m = 197 \text{ см}.$$

$$b^1{}_p = b_p = 0,7 \cdot 44,4 = 31,1 \approx 31 \text{ см}.$$

$$R_p = \frac{960}{2 + \frac{8 \cdot 960 \cdot 1,8(1,5-1)}{31^2}} = 104,5 \text{ см}.$$

По (71), (71в) и (71с) определяем:

$$t_2 \cong t_1 \cong 6,28 \text{ см},$$

поэтому

$$n_2 \approx \frac{31}{6,28} = 4,93 \approx 5;$$

$$q_b \geqslant \frac{0,2 \cdot 3 \cdot 2^6/_{17} \cdot 2 \cdot 710}{5} \approx 400 \text{ мм}^2;$$

$$d_b = 0,113\sqrt{400} \approx 2,25 \text{ см},$$

$$q_R = 0,5 \cdot 5 \cdot 400 \approx 1000 \text{ мм}^2.$$

С помощью (72а), (72), (74) и (74а) получаем:

$$\sigma_N = 1 + \frac{10 \cdot 1,8}{44,4} = 1,4;$$

$$b_m = \frac{52,7 \cdot 10^6 \cdot 1,4}{0,95 \cdot 197 \cdot 17500} = 22,4 \approx 22,5 \ см;$$

$$h_p \cong 0,3(31-22,5)+2,25 = 4,8 \approx 5 \ см;$$

$$h_m = 10,5 \cdot 1,8+8 = 26,9 \approx 27 \ см.$$

Вес полюсов и демпферной клетки находим по (75), (76) и (77).

$$G_m \approx 68 \cdot 197(27 \cdot 22,5+0,8 \cdot 5 \cdot 31)0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 72700 \ кг.$$

$$G_b = 68 \cdot 5 \cdot 400(197+12) \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 2530 \ кг.$$

$$G_R = 2 \cdot 3,14(960-2 \cdot 1,8-2,25) \cdot 1000 \cdot 1,15 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 1230 \ кг.$$

Пример 3. С помощью (69) и (69а) находим:

$$l_p = l_m = l_t = 46,5 \ см.$$

$$b^1_p = 0,7 \cdot 32,7 = 22,9 \approx 23 \ см.$$

По (71) находим допустимые шаги пазов t_2 демпферной клетки и число пазов n_2:

$$t_2 \approx 0,85 \cdot 2,73 \approx 2,32 \ см;$$

$$t^1_2 \approx 1,15 \cdot 2,73 \approx 3,14 \ см.$$

Отсюда:

$$n_2 \approx \frac{b^1_p}{t_2} = \frac{23}{2,32} \approx 10;$$

$$n^1_2 \approx \frac{23}{3,14} \approx 7,3 \approx 7.$$

Примем: $n_2 = 7$.

По (71в) находим:

$$q_b > \frac{0,2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 8 \cdot 39,6}{7} \approx 109 \ мм^2.$$

$$d_b = 0,113\sqrt{109} = 1,18 \approx 1,2 \ см.$$

Таким образом принимаем:

$$d_b = 1,2 \ см. \quad q_b = 113 \ мм^2.$$

Проверяем шаг пазов по (71d):

$$t_2 \approx \frac{23-1,2-2 \cdot 0,3}{7-1} = 3,53 \text{ см},$$

т. е. несколько больше, чем требует (71).

Сечение короткозамыкающих колец находим по (71с):

$$q_R \approx 0,5 \cdot 7 \cdot 113 = 396 \approx 400 \text{ мм}^2.$$

По (72а) и (72) получаем:

$$\sigma_N \approx 1 \cdot \frac{10 \cdot 0,55}{32,7} = 1,168 \approx 1,17;$$

$$b_m = \frac{7,66 \cdot 10^6 \cdot 1,17}{0,95 \cdot 46,5 \cdot 17500} = 11,6 \approx 11,5 \text{ см}.$$

Изготовив масштабный эскиз ротора, подобный рис. 13, находим из него:

$$b_p = 22,5 \text{ см}. \quad h_p = 4,6 \text{ см}. \quad h_m = 10,5 \text{ см}$$

$$D_j = 31,2 \text{ см}.$$

Проверяем полученные размеры:

$$D_i = D_j + 2h_m + 2h_p + 2\delta = 31,2 + 2 \cdot 10,5 + 2 \cdot 4,6 + 2 \cdot 0,55 = 62,5 \text{ см}.$$

С помощью (75), (76) и (77) находим:

$$G_m = 6 \cdot 46,5(10,5 \cdot 11,5 + 0,8 \cdot 4,6 \cdot 22,5)0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 420 \text{ кг}.$$

$$G_b = 6 \cdot 7 \cdot 113(46,5 + 8)8,9 \cdot 10^{-5} = 23 \text{ кг}.$$

$$G_R = 2 \cdot 3,14(62,5 - 2 \cdot 0,55 - 1,2)400 \cdot 1,15 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 15,5 \text{ кг}.$$

§ 15. Размеры обода ротора

Сердечник (обод) ротора представляет собою одну из следующих конструкций [*Л*. 1] в зависимости от размеров и скорости вращения машины:

а) в малых и быстроходных машинах — массивную или шихтованную (собранную из листов) цилиндрическую или 2р-гранную втулку, напрессованную на вал (рис. 12 и 13);

в) в средних и тихоходных машинах с угонной скоростью $n_y = 1,2n_N$ — сварное или литое колесо со спицами и ступицей (рис. 9 и 14);

с) в больших гидрогенераторах — колесо, собранное из сегментов листовой стали.

В большинстве случаев конструкция и размеры поперечного сечения обода ротора определяются требованиями механической прочности и заданным маховым моментом и получаются с избытком, достаточным для проведения магнитного потока. Только в тихоходных машинах с горизонтальным валом поперечное сечение обода, выполняемого по пункту (*b*), определяется величиной магнитного потока полюса.

Ввиду этого при электрическом расчёте машины следует найти только наружный диаметр обода D_j, его длину l_j и наименьшее допустимое двойное поперечное сечение $2Q_j$, предоставляя конструктору при разработке проекта увеличить сечение обода до нужных размеров.

Наружный диаметр обода (рис. 8 и 9):

$$D_j = D_i - 2(\delta + h_p + h_m) \text{ см.} \tag{78}$$

Длина обода (рис. 8):

$$l_j \geqslant l_t + (10 \div 15) \text{ см.} \tag{79}$$

Наименьшее допустимое двойное поперечное сечение обода $2Q_j$ и его наименьшая толщина h_j определятся из уравнения:

$$\Phi_N \sigma_N = 2Q_j B_j = 2h_j l_j B_j. \tag{80}$$

Здесь: Φ_N и σ_N — по §§ 7 и 14. Индукцию B_j для стального обода следует принимать от 11000 до 12000 (14000), а для чугунного — от 5000 до 5500 (6000).

Из (80) находим, округляя результаты в большую сторону до удобных чисел:

$$\left.\begin{aligned} 2Q_j &\geqslant \frac{\Phi_N \cdot \sigma_N}{B_j} \text{ см}^2 \\ \text{и} \quad & \\ h_j &\geqslant \frac{\Phi_N \cdot \sigma_N}{2l_j B_j} \text{ см} \end{aligned}\right\} . \tag{81}$$

Вес активной части обода, выполняемого по форме (в):

$$G_j = \pi(D_j - h_j)h_j l_j \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ кг.} \tag{82}$$

Для роторов, выполняемых по пп. (а) и (с), размеры и вес обода устанавливают при разработке конструкции, руководствуясь (78), (79) и (81). Для гидрогенераторов вес обода

приближенно можно определить до разработки конструкции по (82), подставив:

$$l_j \approx l_t \text{ и } h_j = b_0 \qquad \text{(см. § 2).}$$

Пример: 1. По (78)...(81) и данным §§ 12, 4 и 2 получаем (рис. 12):

$$D_j = 45 - 2(0,3 + 2 + 11,2) = 18 \text{ см.}$$

$$l_j = 18 + 10 = 28 \text{ см.}$$

$$2Q_j \geqslant \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 1,13}{12000} \cong 190 \text{ см}^2 .$$

Пример 2. По (78)...(82) и данным §§ 12, 14 и 2 находим:

$$D_j = 960 - 2(1,8 + 5 + 27) = 892,4 \text{ см.}$$

$$l_j \geqslant 197 + 15 = 212 \text{ см.}$$

$$2Q_j \geqslant \frac{52,7 \cdot 10^6 \cdot 1,4}{12000} = 6150 \text{ см}^2 .$$

$$G_j \approx \pi(892,4 - 60)60 \cdot 197 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 242000 \text{ кг.}$$

Пример 3. По (78) ... (81) находим (рис. 13):

$$D_j = 62,5 - 2(0,55 + 4,6 + 10,5) = 31,2 \text{ см.}$$

$$l_j \cong 46,5 + 10 = 56,5 \approx 56 \text{ см.}$$

$$2Q_j \geqslant \frac{7,66 \cdot 10^6 \cdot 1,17}{12000} = 750 \text{ см}^2 .$$

§ 16. Размеры, индукции и намагничивающие ампервитки участков магнитной цепи

1. Воздушный зазор

Индукция в воздушном зазоре (§ 8):

$$B_\delta = \frac{\Phi}{Q_\delta} . \tag{83}$$

Полные ампервитки намагничивания воздушного промежутка на пару полюсов:

$$AW_\delta = 1,6\delta^1 \kappa_\delta B_\delta . \tag{83а}$$

Здесь:

Q_{δ} — по § 8.

δ^1 — по § 12.

κ_{δ} — по § 13.

2. Зубцы статора

Длина пути магнитного потока в зубцах (§ 6):

$$L_z = 2h_п \ см. \qquad (84)$$

Индукция в среднем сечении зубца:

$$B_{zm} = \kappa_{sm} B_{\delta} , \qquad (84a)$$

где

κ_{sm} — по § 8.

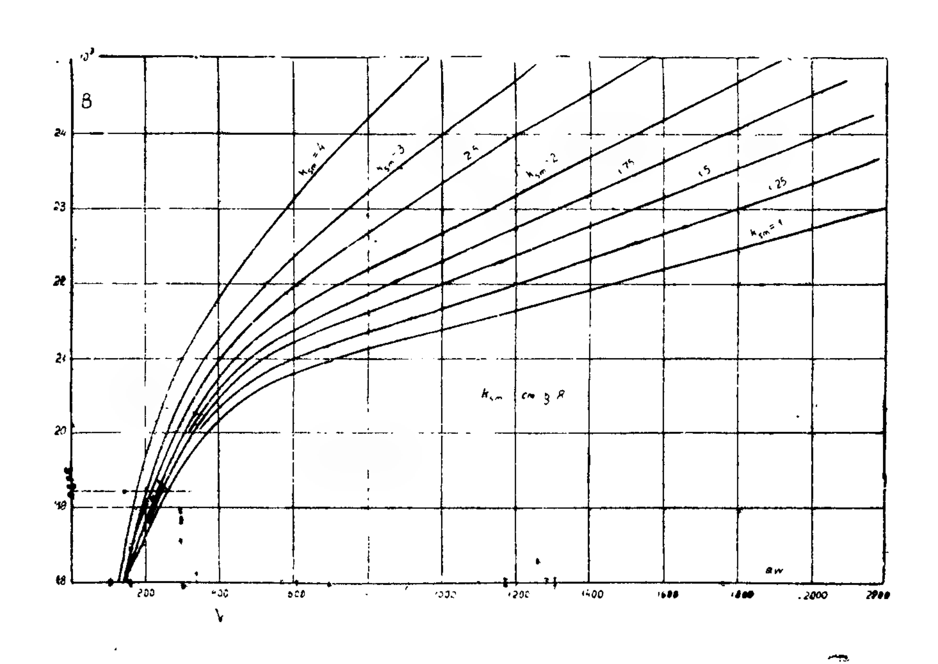


Рис. 10. Кривая намагничивания слаболегированной и среднелегированной стали для зубцов статора.

Удельные ампервитки намагничивания зубцов aw_z, для индукций $B < 18000$ брать по таблице 9; для индукций $B > 18000$ — по кривым рис. 10.

Полные ампервитки намагничивания зубцов на пару полюсов:

$$AW_{z1} = L_{z1} \cdot aw_{z1}, \qquad (84в)$$

3. Спинка (сердечник) статора

Длина пути магнитного потока в спинке статора (§ 9):

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{2p} \text{ см}. \qquad (85)$$

Индукция в спинке статора (§ 9):

$$B_a = \frac{\Phi}{2Q_a} \cdot \qquad (85а)$$

Удельные ампервитки намагничивания спинки статора aw_a брать по таблице 10.

Полные ампервитки намагничивания спинки статора на пару полюсов:

$$AW_a = L_a \cdot aw_a \,. \qquad (85в)$$

4. Зубцы демпферной обмотки

Длина пути магнитного потока в зубцах демпферной клетки (§ 14):

$$L_{z2} \cong 2d_b \text{ см}. \qquad (86)$$

Среднее поперечное сечение зубцов демпферной клетки (§ 14) [Л. 9]:

$$Q_{z2} = 0{,}95 l_t (b_p - 0{,}94 n_2 d_b) \text{ см}^2. \qquad (86а$$

Средняя индукция в зубцах демпферной клетки:

$$B_{z2} \cong \frac{1{,}05\Phi}{Q_{z2}} \cdot \qquad (86в)$$

Удельные ампервитки намагничивания aw_{zb} брать по таблице 11.

Полные ампервитки намагничивания зубцов демпферной клетки на пару полюсов:

$$AW_{zb}=L_{zb}\cdot aw_{zb}. \qquad (86c)$$

5. Сердечники полюсов

Длина пути магнитного потока в паре полюсов (§ 14) [Л. 9]:

$$L_m=2(h_m+h_p-d_b)\ см. \qquad (87)$$

Поперечное сечение сердечника полюса (§ 13):

$$Q_m=0,95b_m l_t\ см^2. \qquad (87a)$$

Эквивалентная средняя индукция в сердечнике полюса:

$$B_{mэ}=\frac{0,50(\sigma_N+1)\Phi}{Q_m}, \qquad (87в)$$

где

$$\sigma_N — по\ §\ 14.$$

Удельные ампервитки $aw_{mэ}$ для индукции $B_{mэ}$ брать по таблице 11.

Полные ампервитки намагничивания пары полюсов:

$$AW_m=L_m\cdot aw_{mэ}. \qquad (87c)$$

6. Стык полюсов с сердечником ротора

Ампервитки стыка на пару полюсов:

при шихтованном или массивном стальном сердечнике [Л 9]:

$$AW_c=0,035\left(\frac{l_t}{300}+0,8\right)B_{mэ}; \qquad (88)$$

при чугунном сердечнике

$$AW_c=0,055\ B_{mэ}. \qquad (88a)$$

7. Сердечник (обод) ротора

При конструкции ротора, указанной в пунктах (*a*) и (*c*) параграфа 15, магнитным сопротивлением и ампервитками намагничивания сердечника ротора можно пренебречь.

При конструкции ротора по пункту (*в*) параграфа 15 имеем:

длина пути магнитного потока в ободе (§ 15):

$$L_j = \frac{\pi D_j}{2p} см. \qquad (89)$$

Индукция в ободе (§ 15):

$$B_j = \frac{\sigma_N \Phi}{2Q_j}. \qquad (89a)$$

Удельные ампервитки aw_j для стального сердечника брать по таблице 11, а для чугунного — по таблице 12.

Полные ампервитки намагничивания сердечника ротора

$$AW_j = L_j \cdot aw_j. \qquad (89b)$$

Таблица 9

Кривая намагничивания среднелегированной и слаболегированной листовой электротехнической стали (для зубцов статора)

B_z	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000
aw, *см*	1,7	2,1	2,6	3,2	4	5	6,5
B_z	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000
aw, *см*	8,4	11,4	16	25	44	78	130

Таблица 10

Кривая намагничивания слаболегированной и среднелегированной листовой электротехнической стали (для сердечника статора)

B_a	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000
aw, *см*	1,3	1,6	1,9	2,3	2,8	3,3	4,1	5,1
B_a	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	—
aw, *см*	6,6	9	13,7	22	36	50	75	—

Таблица 11

Кривая намагничивания листовой стали полюсов и литой (и прокатной) стали ярма

B	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000
$aw/см$	2,5	3	3,5	4	4,8	5,7	6,9	8,5
B	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000
$aw/см$	10,8	15	23	40	70	120	190	290

Таблица 12

Кривая намагничивания серого чугуна

B	3000	4000	5000	6000	7000
$aw/см$	8	13	19	30	45
B	8000	9000	10000	11000	12000
$aw/см$	65	92	130	200	300

Пример 1. По (83) . . . (88) находим:

1) Воздушный промежуток:

$$B_\delta = \frac{\Phi}{297};$$

$$AW_\delta = 1,6 \,.\, 0,35 \,.\, 1,37 \,.\, B_\delta = 0,765 \,.\, B_\delta \,.$$

2) Зубцы статора:

$$L_z = 2 \,.\, 5,2 = 10,4 \text{ см};$$

$$B_{zm} = 1,8 \,.\, B_\delta \,;$$

$$Aw_z = 10,4 \,.\, aw_z .$$

3) Сердечник статора:

$$L_a=\frac{\pi(68-6,3)}{6}=32\ \text{см};$$

$$B_a=\frac{\Phi}{176};$$

$$AW_a=32\ .\ aw_a\ .$$

4) Полюсы:

$$L_m=2(11,2+2)\cong 26\ \text{см};$$

$$Q_m=0,95\ .\ 18\ .\ 7,5=128\ \text{см}^2;$$

$$B_{m\text{э}}=\frac{0,50(1,13+1)\Phi}{128}=\frac{\Phi}{120};$$

$$AW_m=26\ .\ aw_{m\text{э}}\ .$$

5) Стык полюсов:

$$AW_c=0,035\left(\frac{18}{300}+0.8\right)B_{m\text{э}}=0,03\ .\ B_{m\text{э}}\ .$$

6) Обод (втулка) ротора не учитываем.

П р и м е р 2. Находим по (83) . . . (89):

1) Воздушный промежуток:

$$B_\delta=\frac{\Phi}{6100};$$

$$AW_\delta=1,6\ .\ 2,1\ .\ 1,15\ .\ B_\delta=3,87\ .\ B_\delta\ .$$

2) Зубцы статора:

$$L_z=2\ .\ 18,4=36,8\ \text{см};$$

$$B_{zm}=2,10\ .\ B_\delta\ ;$$

$$AW_z=36,8\ .\ aw_z.$$

3) Сердечник (спинка) статора:

$$L_a=\pi\frac{(1024-13,6)}{68}\cong 47\ \text{см};$$

$$B_a = \frac{\Phi}{4100};$$

$$AW_a = 47 \cdot aw_a.$$

4) Зубцы демпферной клетки:

$$L_{z2} = 2 \cdot 2{,}25 = 4{,}5\ см;$$

$$Q_{z2} = 0{,}95 \cdot 197(31 - 0{,}94 \cdot 5 \cdot 2{,}25) = 3770\ см^2;$$

$$B_{z2} = \frac{1{,}05\Phi}{3770} = \frac{\Phi}{3600};$$

$$AW_{z2} = 4{,}5 \cdot aw_{z2}.$$

5) Полюсы:

$$L_m = 2(27 + 5 - 2{,}25) = 59{,}5\ см;$$

$$Q_m = 0{,}95 \cdot 22{,}5 \cdot 197 = 4200\ см^2;$$

$$B_{mэ} = \frac{0{,}50(1{,}4 + 1)\Phi}{4200} = \frac{\Phi}{3500};$$

$$AW_m = 59{,}5 \cdot aw_{mэ}.$$

6) Стык полюса и обода:

$$AW_c = 0{,}035\left(\frac{197}{300} + 0{,}8\right)B_{mэ} = 0{,}051 \cdot B_{mэ}.$$

7) Обод ротора не учитываем.

$$AW_j \approx 0.$$

Пример 3. Подобно примеру 2 получаем следующие данные:

$B_\delta = \frac{\Phi}{1070}$; $AW_\delta = 1{,}6 \cdot 0{,}64 \cdot 1{,}27 \cdot B_\delta = 1{,}29 \cdot B_\delta$;

$B_{zm} = 1{,}92 \cdot B_\delta$ $AW_z = 14{,}8 \cdot aw_z$;

$B_a = \frac{\Phi}{583}$; $AW_a = 45{,}5 \cdot aw_a$;

$$B_{z2}=\frac{\Phi}{620}; \qquad AW_{z2}=2{,}4\cdot aw_{z2};$$

$$B_{m}=\frac{\Phi}{510}; \qquad AW_{m}=21\cdot aw_{a};$$

$$AW_{c}=0{,}0336\cdot B_{m}.$$

Втулку ротора не учитываем:

$$AW_{j}\approx 0.$$

§ 17. Расчет кривой намагничивания

Для построения кривой намагничивания синхронной машины составляем таблицу 13 или 13а, приняв за единицу полезного магнитного потока и э.д.с их значения при холостом ходе с номинальным напряжением (§ 7).

Пользуясь данными, подготовленными в § 16, находим для нескольких значений магнитного потока индукции удельные и полные ампервитки намагничивания для отдельных участков магнитной цепи и суммарные ампервитки AW_t, как показано в таблицах 13 и 13а. Найденные значения AW_t округляем оставляя только три первые значащие цифры и заменяя, нулями остальные.

По данным таблицы 13 и 13а строим (рис. 11 или 11а) кривую *Ochde* намагничивания (характеристику холостого хода), а также прямую намагничивания воздушного промежутка *Ob*, приняв за единицу ампервитки холостого хода.

Коэффициент насыщения κ_{μ}, т. е. отношение полных ампервитков намагничивания к ампервиткам воздушного промежутка (рис. 11 или 11а), обычно находится в пределах 1,10÷1,25 для больших машин и 1,10÷1,50 для малых машин:

$$\kappa_{\mu}=\frac{AW_{t0}}{AW_{\delta 0}}=\frac{\overline{ac}}{\overline{ab}}=1{,}10\div 1{,}25\div 1{,}50. \qquad (90)$$

С помощью характеристики холостого хода и данных § 13 находим окончательное значение *ОКЗ*:

$$ОКЗ=\frac{AW_{t0}}{AW_{k}}. \qquad (91)$$

Стандартная характеристика холостого хода (к которой следует, по возможности, стремиться при расчете машины) имеет следующие соотношения:

E_0	0,58	1	1,21	1,33	1,4	1,47	1,51
i_0, AW_{t0}	0,50	1	1,5	2	2,5	3	3,5

Пример 1. Составляем таблицу 13, как описано выше, и по ней строим характеристику холостого хода (рис. 11).

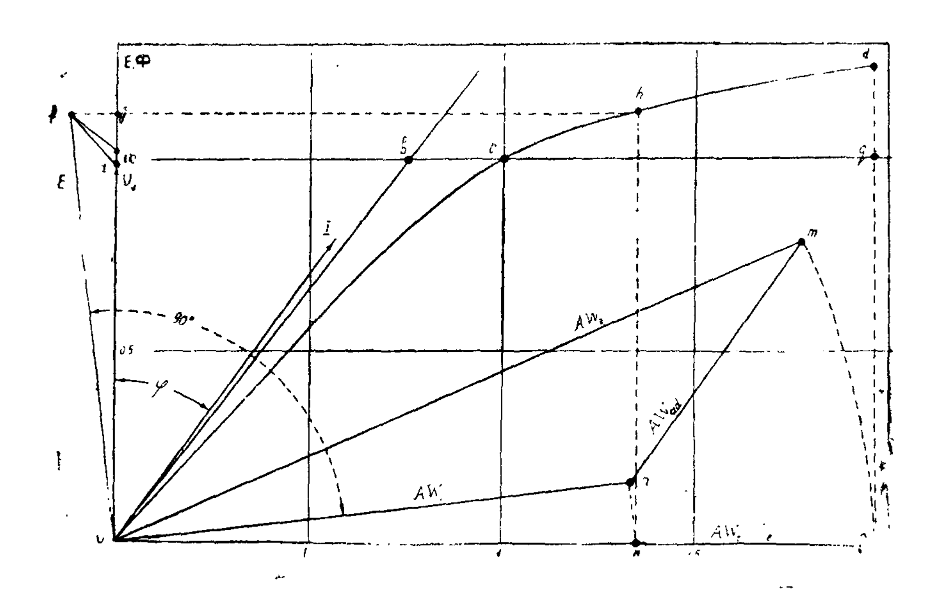


Рис. 11. Характеристика холостого хода и диаграмма мдс

По (90) и (91) находим:

$$K_\mu = \frac{AW_{t0}}{AW_{\delta 0}} = \frac{\overline{ac}}{\overline{ab}} = \frac{6300}{4800} = 1,31;$$

$$ОКЗ = \frac{AW_{t0}}{AW_k} = \frac{6300}{5330} = 1,18.$$

Таблица 13

Расчет характеристики холостого хода

Е, Ф	0,5	1	1,15	1,25
Ф	$0{,}93 \cdot 10^6$	$1{,}86 \cdot 10^6$	$2{,}14 \cdot 10^6$	$2{,}32 \cdot 10^6$
B_δ		6250	7200	7800
B_{zm}		11300	13000	14000
B_a		10500	12200	13200
$B_{mэ}$		15500	17800	19300
B_j		—	—	—
aw_{zm}		7	11,4	16
aw_a		3	4,3	5,4
$aw_{mэ}$		33	110	220
aw_j	—	—	—	—
AW_δ		~4800	5500	5970
AW_z		73	120	167
AW_a		96	138	173
AW_m		860	2860	5700
AW_c		465	535	580
AW_j	—	—	—	—
AW_{to}		~6300	9150	12600
		1	1,45	2

Пример 2. Составляем таблицу 13а, как описано выше, и по ней строим на рис. 11а характеристику холостого хода.

Таблица 13а

Расчет кривой намагничивания (характеристики холостого хода)

E, Ф	0,5	1	1,2	1,3
Ф	24,4 . 10^6	48,8 . 10^6	58,5 . 10^6	63,3 . 10^6
B_δ		7970	9950	
B_{zm}		16800	20200	
B_a		11900	14300	
B_{z2}		13600	16300	
$B_{mэ}$		15400	18500	
B_j	—	—	—	—
aw_{zm}		75	210	
aw_a		4	7	
aw_{z2}		14	45	
$aw_{mэ}$		30	155	
aw_j	—	—	—	—
AW_δ		31000	37000	
AW_z		1770	7700	
AW_a		190	330	
AW_{z2}		68	200	
AW_m		2800	9200	
AW_c		790	950	
AW_j	—	—	—	—
AW_t		38000	54900	
		1	1,45	

По (90) и (91) находим:

$$к_{\mu}=\frac{AW_{to}}{AW_{\delta o}}=\frac{\overline{ac}}{\overline{ab}}=\frac{38000}{31000}=1,25.$$

Окончательное значение *ОКЗ*:

$$ОКЗ=\frac{AW_{to}}{AW_{k}}=\frac{38000}{23630}=1,60.$$

Пример 3. Рассчитав таблицу, подобную таблице 13а, получаем следующие результаты:

$AW_{to}=10030$; $AW_{\delta o}=8600$ (§ 13).

Коэффициент насыщения:

$$к_{\mu}=\frac{AW_{to}}{AW_{\delta o}}=\frac{10030}{8600}=1,17.$$

Окончательное значение отношения короткого замыкания (§ 13):

$$ОКЗ=\frac{AW_{to}}{AW_{k}}=\frac{10030}{9055}=1,11.$$

§ 18. Диаграмма м.д.с

С целью определения ампервитков возбуждения AW_{n}, необходимых для поддержания номинального напряжения генератора при номинальном токе нагрузки и заданном коэффициенте мощности $Cos\varphi$, нужно построить диаграмму мдс (рис 11 и 11а), приняв за единицы магнитного потока, эдс и ампервитков возбуждения значения этих величин, соответствующие холостому ходу с номинальным напряжением.

Активное и реактивное падения напряжения в обмотке статора синхронной машины, в долях номинального напряжения U_{N}, в общем случае равны:

$$\left.\begin{matrix} R^{1}_{eff}\cdot I \\ x^{1}_{p}\cdot I \end{matrix}\right\}, \qquad (92)$$

где R^{1}_{eff} и x^{1}_{p} — сопротивления обмотки статора в относительных единицах (§§ 11 и 13);

I — ток статора в долях номинального тока.

При номинальной нагрузке ток статора равен единице, а потому падения напряжения (92) численно равны R^1_{eff} и x^1_p. Сложим их геометрически с вектором номинального напряжения $\overline{Oa}$ (рис. 11 и 11а), откладывая их от точки a, соответственно, по направлению вектора тока I и под углом 90° к вектору тока I, отстающего на заданный угол φ от вектора напряжения U_N. Таким образом получим вектор внутренней эдс $E_i = \overline{Of}$ (заметим, что в больших машинах, как например на рис. 11а, вектор падения напряжения в активном сопротивлении $R^1_{eff}I$ весьма мал и им можно пренебречь).

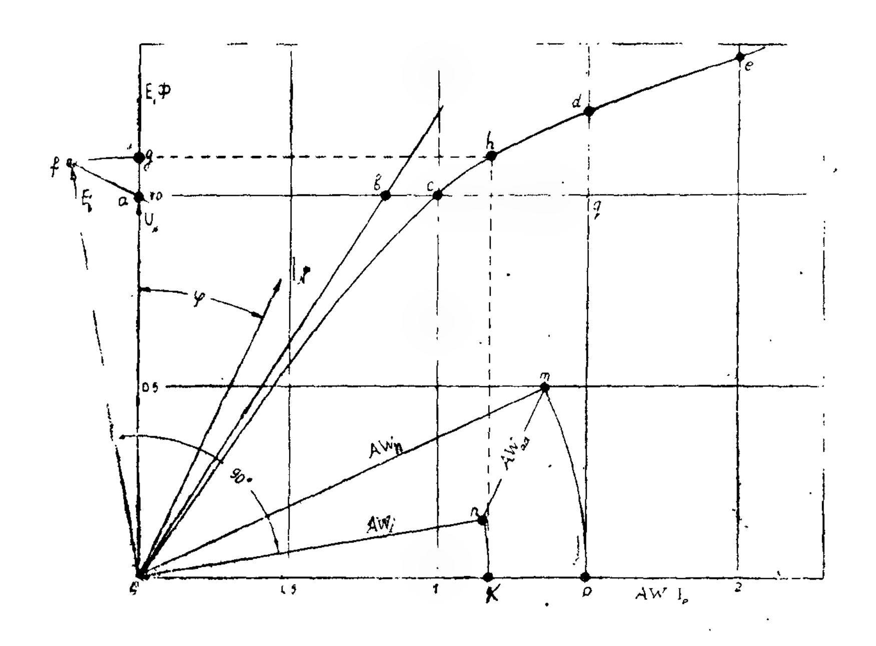


Рис. 11а. Характеристика холостого хода и диаграмма мдс

С помощью дуги fg и прямых gh и $hк$ находим по характеристике холостого хода ампервитки возбуждения $\overline{Oк} = AW_i$, необходимые для создания эдс E_i, и откладываем их в виде отрезка On на прямой, перпендикулярной вектору E_i. Вычислив продольную составляющую реакции якоря AW_{ad} (§ 13), наносим её на диаграмму в виде вектора $\overline{nm} = AW_{ad}$, параллельного вектору тока I_N, и таким образом получаем искомые ампервитки возбуждения AW_n в виде результирующего вектора $\overline{Om}$.

Для определения повышения напряжения генератора при сбросе нагрузки перенесем вектор $\overline{Om}=AW_n$ с помощью дуги mp на ось абсцисс в виде отрезка Op и проведём ординату pqd; тогда повышение напряжения генератора ΔU в долях номинального напряжения выразится отношением:

$$\Delta U=\frac{\overline{qd}}{\overline{pq}} . \qquad (93)$$

При работе машины в режиме синхронного компенсатора вектор тока I_N почти совпадает с осью абсцисс, а внутренняя эдс E_i при нормальной нагрузке практически совпадает с осью ординат и равна:

$$E_i \approx U_N(1+x^1{}_p), \qquad (94)$$

поэтому вектор полных ампервитков возбуждения AW_n почти совпадает с осью абсцисс и равен арифметической сумме ампервитков AW_i и AW_{ad}, т. е.:

$$AW_n=AW_i+AW_{ad}, \qquad (95)$$

Если синхронную машину перевести из генераторного режима в режим двигателя при том же токе статора I и неизменном токе возбуждения, то вектор тока I переместится из верхнего правого квадранта в нижний правый квадрант, а вектор E_i перейдет из левого верхнего квадранта в правый верхний квадрант; при этом диаграмма сложения ампервитков $OnmO$ рис. 11 или 11а переместится в правый нижний квадрант, повернувшись на 180° вокруг оси абсцисс, и машина будет доставлять в сеть приблизительно ту же реактивную мощность. Отсюда следует, что ампервитки возбуждения синхронной машины, работающей в генераторном и двигательном режимах при одинаковых значениях тока I и $Cos\varphi$, приблизительно равны между собой.

Построив диаграмму мдс для заданного режима работы синхронной машины (генератор, компенсатор, двигатель) и определив из неё полные ампервитки возбуждения, нужно еще найти отношение:

$$\frac{E_i}{U_N}=\frac{B_{zmN}}{B_{zmo}}=\frac{B_{aN}}{B_{ao}} , \qquad (96)$$

которое потребуется в дальнейшем для расчета потерь в железе статора. Из (96) получаем:

$$B_{zmN}=B_{zmo}\frac{E_i}{U_N}; \qquad B_{aN}=B_{ao}\frac{E_i}{U_N}, \tag{97}$$

где B_{zmo} и B_{ao} — индукции в зубцах и в спинке статора при холостом ходе, а B_{zmN} и B_{aN} — те же индукции при номинальной иагрузке.

Статическую перегружаемость генератора и двигателя можно определить по приближенной формуле [Л. 9, 18]:

$$P_{max}\approx\frac{U \cdot AW_n}{U_N \cdot AW_{\delta o} \cdot x_d \cdot cos\varphi_N}\ \partial/e\partial. \tag{98}$$

Пример 1. С помощью данных §§ 11 и 13 находим по (92):

$$R^1{}_{eff} \cdot I_N=0,0261 \cdot 1=0,0261;$$

$$x^1{}_p \cdot I_N=0,157 \cdot 1=0,157.$$

Так как по §§ 13 и 17 — $AW_{ad}=4820$ и $AW_{to}=6300$, то в относительных единицах:

$$AW_{ad}=\frac{4820}{6300}=0,765\ \partial/e\partial.$$

Построив диаграмму рис. 11', находим:

$$AW_n=1,96 \text{ или}$$

$$AW_n=1,96 \cdot 6300\cong12300 \text{ а. в. на пару полюсов.}$$

Повышение напряжения при сбросе номинальной нагрузки:

$$\Delta U=\frac{0,24}{1}=0,24\ \partial/e\partial.\ (24\%).$$

Из диаграммы рис. 11 находим отношение:

$$\kappa_E=\frac{E_i}{U_N}=1,12.$$

По (98) находим статическую перегруженность при номинальном напряжении:

$$P_{max} \approx \frac{1 \, . \, 12300}{1 \, . \, 4800 \, . \, 1{,}106 \, . \, 0{,}8} = 2{,}89.$$

Пример 2. По (92) находим (§§ 11 и 13):

$$R^1_{eff} \cdot I_N = 0{,}0036;$$

$$x^1_p I_N = 0{,}203.$$

Так как по §§ 13 и 17 $AW_{ad}=18200$ и $AW_{to}=38000$, то в относительных единицах:

$$AW_{ad} = \frac{18200}{38000} = 0{,}48.$$

Построив диаграмму рис. 11а, находим:

$$AW_n = 1{,}50$$

или

$$AW_n = 1{,}50 \, . \, 38000 = 57000 \text{ а. в./(пару полюсов)};$$

$$\Delta U = \frac{0{,}122}{1} = 0{,}122 \; (12{,}2\%);$$

$$\kappa_E = \frac{E_1}{U_N} = 1{,}09$$

вместо предварительно принятой величины 1,08.

По (98) находим статическую перегружаемость при номинальном напряжении:

$$P_{max} \approx \frac{1 \, . \, 57000}{1 \, . \, 31000 \, . \, 0{,}765 \, . \, 0{,}9} = 2{,}67 \text{ д/ед}.$$

Пример 3. Подобно примерам 1 и 2, построив диаграмму рис. 11 или 11а, находим:

$$AW_n = 1{,}75 (17600);$$

$$\kappa_E = \frac{E_i}{U_N} = 1{,}05;$$

$$P_{max} \approx \frac{1 \cdot 17600}{1 \cdot 8600 \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}8} = 2{,}44 \ \partial/e\partial.$$

§ 19. Обмотка возбуждения

Обмотка возбуждения нормальных явнополюсных машин небольшой мощности, и в особенности машин с $2p < 8$, обычно изготовляется из медного проводника прямоугольного сечения с хлопчатобумажной или асбестовой изоляцией (табл. 8). Катушки такой обмотки (рис. 12 и 13) состоят из многих витков, расположенных в нескольких слоях, причем для возможности размещения их в междуполюсных окнах катушки должны иметь скошенную форму (рис. 12 и 13).

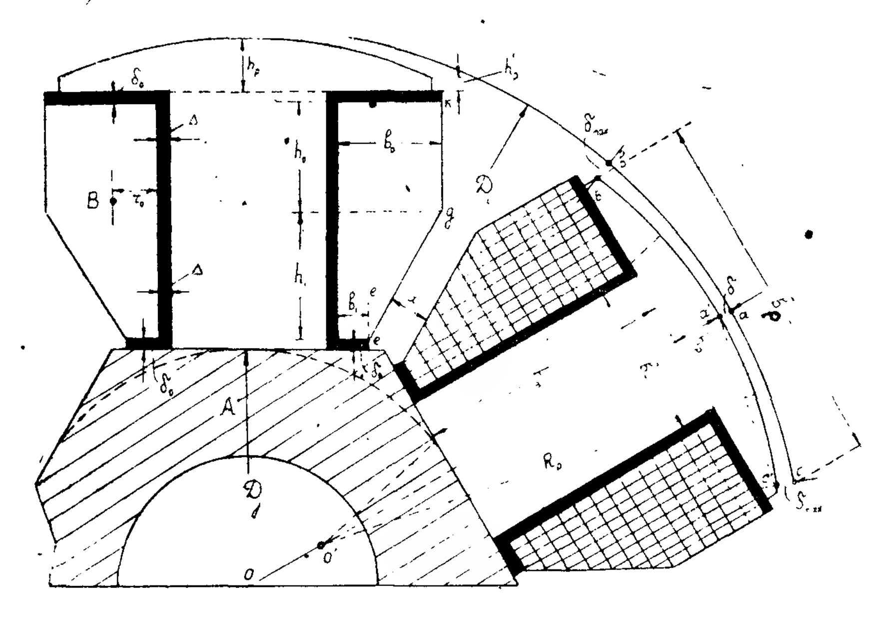


Рис. 12. Эскиз ротора с многослойной обмоткой возбуждения

Обмотки возбуждения многополюсных машин средних и больших мощностей изготовляются из ленточной (полосовой) меди с поперечным сечением q_e от 30 до 800 (1000) *мм*²,

намотанной на ребро (рис. 14). Катушки таких обмоток состоят из витков, расположенных в одном слое, что обеспечивает надёжное охлаждение каждого витка (рис. 14).

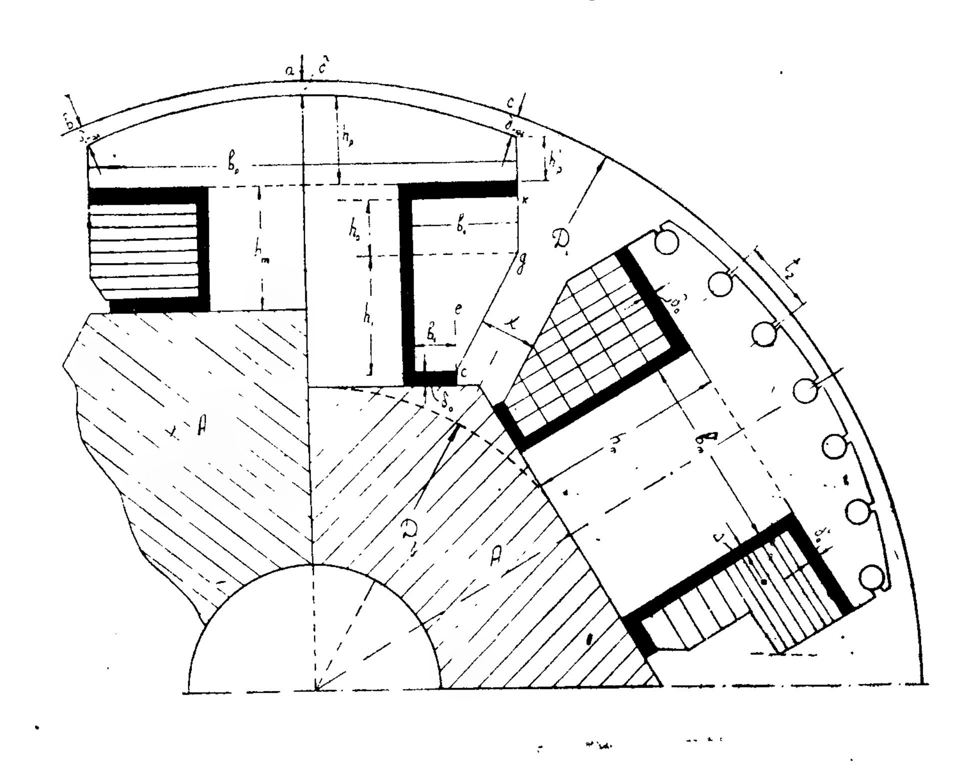


Рис. 13. Эскиз ротора с различными обмотками возбуждения

Изоляция витков состоит из асбестовой бумаги толщиною 0,3÷0,5 *мм*, приклеенной лаком к широкой стороне b медной полосы (рис. 14с). Для увеличения поверхности охлаждения при сечениях $q_e > 300$ *мм*^{2} вместо прямоугольного профиля по рис. 14с применяется полосовая медь с профилем по рис. 14d. Однослойные обмотки из полосовой меди, намотанной на ребро (рис. 14), весьма целесообразны, так как обеспечивают наилучшие условия охлаждения и допускают повышенную нагрузку меди. Поэтому в небольших машинах для возможности осуществления таких обмоток идут на применение возбудителей с ненормальными напряжениями 25, 35, 50, 65, 80 и 100 *вольт*. В машинах средних

мощностей однослойные обмотки возбуждения можно изготовить для нормальных напряжений 115 и 230 *вольт*, в крупных же машинах с мощностью возбуждения в несколько сотен *киловатт* приходится повышать напряжение возбудителей до 300, 400 и 500 *вольт* для избежания слишком больших сечений полосовой меди, затрудняющих изготовление обмотки, и для избежания слишком больших токов возбуждения. При выборе напряжения возбудителя U_e необходимо учитывать заданную кратность „потолка" напряжения возбудителя, который, по возможности, не должен превышать 1000÷1200 *вольт*.

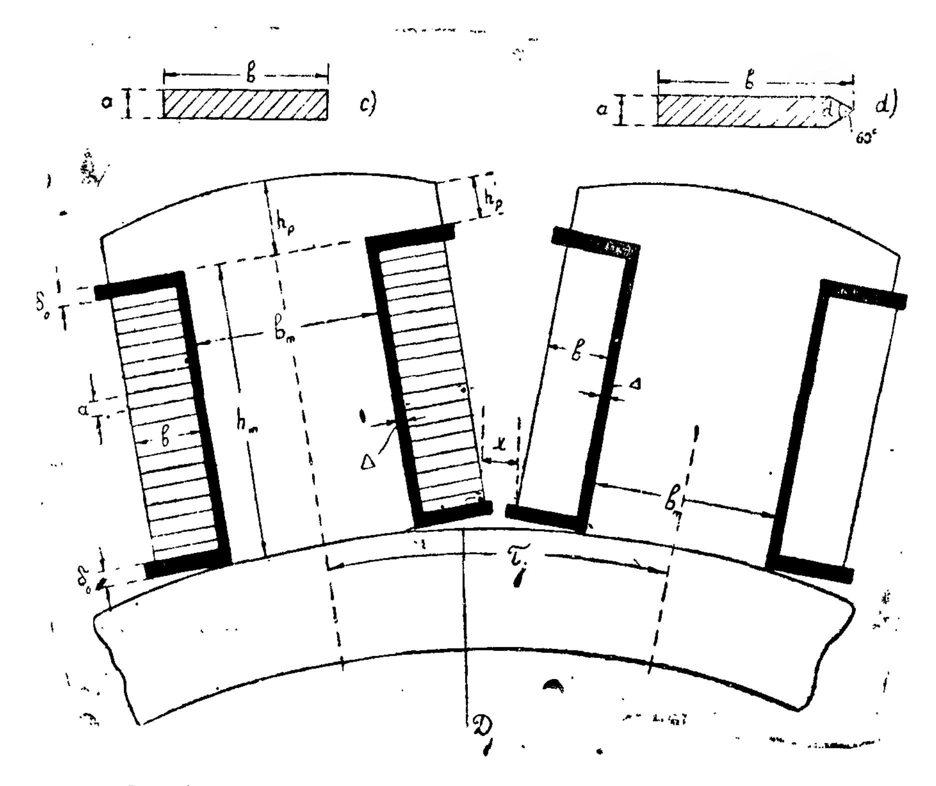


Рис. 14. Эскиз ротора с однослойной обмоткой возбуждения

Для расчета обмотки возбуждения находим предварительную среднюю длину l_e одного витка по приближенной формуле:

$$l_e \approx 2(l_t + b_m) + (10 \div 25) \text{ см.} \quad (99)$$

Здесь:

l_t и b_m — Длина и ширина сердечника полюса в *см* (§ 14);

10 *см* — прабавка для малых машин;

25 *см* — прибавка для крупных машин.

Далее определяем поперечное сечение проводника обмотки q_e (в $мм^2$):

$$q_e = 1,15 \frac{1,32 \cdot l_e \cdot p \cdot AW_п}{5700 \cdot U_e} мм^2 . \qquad (100)$$

Здесь:

l_e — по (99);

p — число пар полюсов;

$AW_п$ — полные ампервитки возбуждения на пару полюсов (§ 18);

U_e — напряжение возбудителя;

1,32 — температурный коэффициент меди при 95°Ц;

1,15 — коэффициент запаса на неточность расчета и на случай кратковременной работы машины с перегрузкой или с пониженным $cos\varphi$.

При расчете обмоток возбуждения малых и крупных машин следует руководствоваться следующими соображениями:

Небольшие машины с $2p < 8$. Для этих машин наиболее целесообразной является обмотка из изолированного проводника прямоугольного профиля. По технологическим требованиям сечение проводника при прямоугольных сердечниках полюсов должно быть не более 30÷40 $мм^2$, а при круглых сердечниках — не более 60 $мм^2$, причем отношение сторон сечения $\frac{b}{a}$ должно находиться, по возможности, в пределах от 1,5 до 2. Если при нормальных напряжениях источника возбуждения, т. е. при $U_e = 115$ или 230 *в*, сечение проводника, вычисленное по (100), получится меньше 5÷6 $мм^2$, то целесообразно переходить на нестандартные напряжения возбудителя 100, 80, 65, 50, 35 или 25 *в*, так как при $q_e < 6$ $мм^2$ заполнение объёма катушки медью и её теплоотдача резко ухудшаются, в результате чего располагаемые ампервитки возбуждения, а с ними и номинальная мощность машины, катастрофически уменьшаются.

Если при заданном напряжении возбудителя $q_e < 2{,}5$ *мм²*, то необходимо применить круглый проводник, что ещё более катастрофично отзывается на располагаемой (номинальной) мощности машины. Следует отметить, что вообще мощность малых машин ограничивается нагревом обмотки возбуждения.

Выбрав предварительно напряжение возбудителя, необходимо проверить, может ли обмотка возбуждения при полученном из (100) сечении q_e дать требуемые ампервитки возбуждения AW_n, не перегреваясь выше нормы. Для этого нужно изготовить масштабный эскиз ротора рис. 12 или 13, как было прдробно описано в § 14.

По эскизу находим площадь сечения катушки F в *мм²*, определив из эскиза размеры b_o, b_1, h_o и h_1 в ***миллиметрах*** (с учетом масштаба):

$$F = b_o h_o + \frac{b_o + b_1}{2} h_1 \text{ мм}^2 . \tag{101}$$

Отсюда возможное число витков w_e одной катушки:

$$w_e \cong \frac{0{,}96F}{(a^1 + 0{,}2) \cdot (b^1 + 0{,}2)} , \tag{101a}$$

где a^1 и b^1 — размеры изолированного проводника в *мм* (по таблице 8);

0,2 *мм* — прибавка на неизбежные зазоры между витками.

Значение w_e, полученное по (101а), следует несколько округлить в меньшую сторону до удобного числа.

Определив число витков катушки, находим ток возбуждения при номинальной нагрузке (§ 18):

$$I_e = \frac{AW_n}{2w_e} \tag{102}$$

и плотность тока

$$j_e = \frac{I_e}{q_e} a/\text{мм}^2 . \tag{102a}$$

Далее вычисляем повышение температуры (перегрев) обмотки возбуждения по формуле (см. приложение 2 и [Л. 9]):

$$\vartheta_{cu2}=\frac{(2,8+\xi)A\,W_n\cdot j_e}{76\cdot h_s(1,6+\sqrt{v})}\left[1+\frac{\Delta(m-0,5)(1,6+\sqrt{v})}{2,8+\xi}\right]{}^\circ Ц. \qquad (103)$$

Здесь:

$\xi=\frac{l_t}{\tau}$ по § 2:

h_s — боковой периметр катушки kge в *см* (рис. 12 и 13);

v — скорость ротора в *м/сек.* (§ 2);

Δ — двухсторонняя толщина изоляции проводника в *см*, по таблице 8;

m — число слоёв в катушке, равное $\frac{b_0}{a^1}$ или $\frac{b_0}{b^1}$ в зависимости от способа намотки катушки („на широкую" или „на узкую" сторону).

Если повышение температуры окажется более 65°Ц при изоляции класса *A* или более 95° при изоляции класса *B*, то можно попытаться исправить положение с помощью следующих мероприятий:

а) намотка катушки „на узкую сторону", что уменьшит число слоёв в катушке, а с ним и множитель в квадратных скобках в (103);

в) уменьшение напряжения возбудителя, что приведёт к увеличению сечения проводника, уменьшит объём изоляции проводников в катушке и увеличит количество меди в обмотке;

с) уменьшение ширины полюсного сердечника на 3÷6%, что хотя и увеличит ампервитки намагничивания сердечника, но может несколько увеличить количество меди в катушке и располагаемые ампервитки возбуждения;

д) уменьшение воздушного промежутка, что, однако, повлечёт за собою уменьшение *ОКЗ*.

Если эти мероприятия не дадут ожидаемого результата, т. е. не уменьшат повышения температуры до приемлемой величины, то придется пересмотреть весь расчет и пойти на уменьшение выбранных в § 2 значений B_δ и AS, т. е. на увеличение размеров машины (в основном за счет увеличения диаметра), или на снижение её мощности.

Установив окончательный вариант обмотки возбуждения вычисляем уточненную среднюю длину витка l_e:

$$l_e = 2(l_t + b_m) + 2\pi r_0 \ см, \qquad (103а)$$

где: l_t и b_m — длина и ширина сердечника полюса в *см* (§ 14);

r_0 — расстояние от сердечника полюса до центра тяжести B сечения катушки в *см* (рис. 12), найденного глазомерно или графоаналитическим построением.

Остальные параметры обмотки вычисляются по формулам (102), (102а), (108),... (112).

Многополюсные машины всех мощностей. Для этих машин следует преимущественно применять однослойную обмотку из полосовой меди (рис. 14). Если при стандартных напряжениях возбудителя (115 и 230 *в*) сечение проводника обмотки получается по (100) меньше $30 \div 40$ *мм*^{2} и напряжение возбудителя не предписано заданием, то целесообразно для применения однослойной обмотки перейти на одно из следующих не стандартных, но применяемых напряжений; 100, 80, 65, 50, 35 и 25 *в*. Если в крупных машинах при $U_e = 230$ *в* сечение проводника получается больше $700 \div 800$ *мм*^{2}, то нужно принять любое подходящее напряжение возбудителя в пределах до 500 *в*. Во всех случаях при $q_e > 300$ *мм*^{2} выгодно использовать полосовую медь с профилем по рис. 14d, обеспечивающим лучшую теплоотдачу и повышенную нагрузку обмотки.

По конструктивным и технологическим требованиям отношение сторон профилей рис. 14 и 14d должно быть, по возможности,

$$\frac{b}{a} < 10 \div 12 \qquad (103в)$$

и во всех случаях не больше 15. Шинная медь с профилем по рис. 14d изготовляется по специальному заказу с требуемыми размерами вне стандарта.

Наименьшее расстояние x между катушками соседних полюсов многополюсных машин (рис. 14), необходимое для подвода охлаждающего воздуха к катушкам ротора и к вентиляционным каналам статора, а также для установки междукатушечных распорок, должно быть (с некоторым округлением в большую сторону) [см. приложение 2]:

$$x \geqslant \frac{0{,}01 \cdot l_t \cdot \tau}{h_m} + 1{,}3 \ см \qquad (104)$$

С другой стороны, имеем (рис. 14):

$$\tau_j = \frac{\pi D_j}{2p} \approx b_m + 2\Delta + 2b + x \ см, \qquad (104а)$$

Здесь:

τ_j — полюсное деление на ободе ротора;
D_j — наружный диаметр обода ротора (§ 15);
b_m — ширина сердечника полюса (§ 14);
b — ширина меди обмотки в *см*;
x — по формуле (104);
Δ — толщина изоляции сердечника (включая зазоры), равная от 0,3 до 0,5 *см*,

Отсюда получаем наибольшую допустимую ширину обмотки (округляя результат в меньшую сторону):

$$b < 0{,}5\left[\frac{\pi D_j}{2p} - b_m - 2\Delta - x\right] см. \qquad (104в)$$

Зная сечение меди q_e в *мм*^{2}, найденное по (100), и допустимую ширину меди, вычисленную по (104в), определяем толщину меди a в *см* с помощью одной из следующих формул, связывающих величины q_e, a и b для профилей меди по рис. 14с и 14d:

$$a = \frac{q_e}{100 \, . \, b} см \qquad (104c)$$

$$\left.\begin{aligned} a &= 1{,}15\left(b - \sqrt{b^2 - 1{,}73\frac{q_e}{100}}\right) см \\ b &= \frac{q_e}{100a} + 0{,}433a \ см \\ \frac{q_e}{100} &= a(b - 0{,}433a) \ см^2 \end{aligned}\right\} \qquad (104d)$$

При профиле меди по рис. 14с полученные размеры b и a округляем до ближайших нормальных (по таблице 8), а при профиле по рис. 14d — до ближайших удобных.

Установив размеры меди, и имея высоту сердечника полюса h_m, выбранную в § 14, находим число витков на полюс w_e, округляя результат до ближайшего меньшего целого числа, или до ближайшего меньшего числа с половиной (вида $w_e = n + \frac{1}{2}$):

$$w_e \leqslant \frac{0{,}96 \cdot h_m - 2\delta_o}{a+0{,}05}. \qquad (105)$$

Здесь: 0,96 — коэффициент, учитывающий разбухание катушки;

δ_o — толщина изолирующей шайбы в *см* (рис. 14), равная от 0,6 до 1,5 *см*;

0,05 — толщина асбестовой изоляции между витками (в *см*).

Далее находим ток возбуждения и плотность тока:

$$\left.\begin{aligned} I_e &= \frac{AW_п}{2w_e}\ a \\ j_e &= \frac{I_e}{q_e}\ а/мм^2 \end{aligned}\right\}. \qquad (105а)$$

Проверяем повышение температуры (перегрев) обмотки возбуждения по формуле (см. приложение 2 и [Л. 9]):

$$\vartheta_{cu2} = \frac{3(2{,}8+\xi)b \cdot j_e^2}{1{,}6+\sqrt{v}}\ ^\circ Ц. \qquad (105в)$$

Здесь: b — ширина меди в *см*;

ξ и v — как в формуле (103).

Если повышение температуры окажется значительно ниже допустимых значений, то можно для экономии меди (но за счёт увеличения мощности возбуждения) соответственно уменьшить число витков катушки.

В обратном случае, т. е. при перегреве обмотки, следует остановиться на одной из перечисленных ниже возможностей:

а) увеличить число витков обмотки; при этом потери (мощность) возбуждения и нагрев обмотки уменьшатся за счет увеличения её веса;

в) не изменяя числа витков, увеличить высоту меди a и соответственно уменьшить её ширину b; при этом мощность возбуждения не изменится, вентиляция улучшится за счёт уширения междукатушечного окна, и нагрев уменьшится за счёт уменьшения величины b в (105в).

Установив число витков однослойной обмотки, находим окончательные значения тока возбуждения и плотности тока по (105а). Затем определяем высоту полюсного сердечника и среднюю длину витка:

$$h_m = 1{,}04[2\delta_o + w_e(a+0{,}05)]\ см, \qquad (106)$$

где: 1,04 — коэффициент, учитывающий разбухание катушки

$$l_e \approx 2[l_t - 0,5b_m + 1,57(b_m + 0,8 + b)] \text{ см.} \quad (107)$$

Уточнив данные обмотки, нужно рассчитать остальные её параметры, что для всех типов обмоток можно сделать по следующим формулам.

Длина меди всей обмотки:

$$L_e = 2pw_e l_e \text{ см.} \quad (108)$$

Вес меди обмотки:

$$G_{cu2} = L_e \cdot q_e \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} \text{ кг.} \quad (109)$$

Сопротивление обмотки при 95°Ц:

$$R_{e95} = \frac{1,32 \cdot L_e}{5700 \cdot q_e} = \frac{1,32 \cdot 1,96 \cdot G_{cu2}}{q_e^2} \text{ ом.} \quad (110)$$

Коэффициент запаса возбуждения:

$$\kappa_o = \frac{U_e}{R_{e95} I_e} . \quad (111)$$

Номинальная мощность возбудителя:

$$P_{eN} = U_{eN} I_{eN} \cdot 10^{-3} \text{ квт.} \quad (112)$$

Некоторые соображения о выборе скорости возбуждения и „потолка" возбудителя даны в приложении 3.

Определив параметры обмотки возбуждения, можно, если это требуется, вычислить динамические реактивности и постоянные времени синхронной машины по формулам, данным в приложении 1.

Пример 1. Приняв $U_e = 115$ *в*, находим по (99) и (100)

$$l_e = 2(18 + 7,5) + 10 = 61 \text{ см.}$$

$$q_e = \frac{1,15 \cdot 1,32 \cdot 61 \cdot 3 \cdot 12300}{5700 \cdot 115} = 5,2 \text{ мм}^2.$$

Ввиду слишком малого сечения проводника, примем нестандартное напряжение возбудителя $U_e = 35$ *вольт*; при этом получим:

$$q_e = \frac{1,15 \cdot 1,32 \cdot 61 \cdot 3 \cdot 12300}{5700 \cdot 35} \cong 17 \text{ мм}^2.$$

Выбираем по таблице 8 проводник с изоляцией ПБД, с размерами и сечением:

$$\frac{a\times b}{a^1\times b^1}=\frac{3{,}05\times 5{,}9}{3{,}4\times 6{,}25};q_e=3{,}05\times 5{,}9-0{,}2=18-0{,}2=17{,}8\ мм^2.$$

Сделав масштабный эскиз ротора, подобный рис. 12, как описано в параграфе 14, находим следующие размеры сечения катушки:

$b_0=40$ *мм*; $h_0=38$ *мм*; $b_1=10$ *мм*; $h_1=64$ *мм*.

Отсюда определяем по (101) и (101а) сечение катушки и возможное число её витков:

$$F=40\times 30+\frac{(40+10)64}{2}=3120\ мм^2;$$

$$w_e=\frac{0{,}96\ .\ 3120}{(3{,}4+0{,}2)\ (6{,}25+0{,}2)}=129{,}5\approx 129\ \text{витков}.$$

По (102) и (102а) находим:

$$I_e=\frac{12300}{2\ .\ 129}=47{,}7\ a;$$

$$j_e=\frac{47{,}7}{17{,}8}=2{,}68\approx 2{,}7\ a/мм^2.$$

С помощью эскиза, подобного рис. 12, находим периметр сечения катушки в окне $h_s=kge=11$ *см*, и по (103) получаем:

$$\vartheta_{cu2}=\frac{(2{,}8+0{,}77)\ .\ 12300\ .\ 2{,}7}{76\ .\ 11\ .\ (1{,}6+\sqrt{23{,}6}\ )}\left[1+\right.$$

$$\left.+\frac{0{,}035\left(\frac{40}{3{,}4}-0{,}5\right)\left(1{,}6+\sqrt{23{,}6}\right)}{2{,}8+0{,}77}\right]=38^\circ Ц.$$

Как видим, по нагреву обмотка возбуждения имеет значительный запас. Примем окончательно:

$$w_e=125\ \text{витков}.$$

При этом, с помощью (102), (102а), (103в) и масштабного эскиза, подобного рис. 12, находим:

$$I_e=\frac{12300}{2\ .\ 125}=49{,}3\ a;$$

$$j_e=\frac{49{,}3}{17{,}8}=2{,}77\ a/мм^2;$$

$$l_e=2(18+7,5)+6,28\ .\ 1,8=62,4\ см.$$

Далее, по (108) ... (112) получаем:

$$L_e=6\ .\ 125\ .\ 62,4\cong 47000\ см.$$

$$G_{cu2}=47000\ .\ 17,8\ .\ 8,9\ .\ 10^{-5}=74,3\approx 75\ кг.$$

$$R_{e95}=\frac{1,32\ .\ 47000}{5700\ .\ 17,8}=\frac{1,32\ .\ 1,96\ .\ 75}{17,8^2}=0,613\ ома.$$

$$\kappa_o=\frac{35}{0,613\ .\ 49,3}=1,16.$$

$$P_e=35\ .\ 49,3\ .\ 10^{-3}\cong 1,75\ квт.$$

Пример 2. По (99) находим:

$$l_e=2(197+22,5)+25=464\ см.$$

Приняв $U_e=230$, получаем по (100):

$$q_e=1,15\frac{1,32\ .\ 464\ .\ 34\ .57000}{5700\ .\ 230}=1040\ мм^2.$$

Очевидно, что обмотка будет однослойной из шинной меди по рис. 14 и 14d. С целью уменьшения слишком большого сечения меди примем $U_e=350$ *в*; при этом сечение меди уменьшится до

$$q_e=1040\frac{230}{350}\cong 675\ мм^2.$$

По (104) находим:

$$x\geqslant\frac{0,01\ .\ 197\ .\ 44,4}{27}+1,3=4,54\approx 4,6\ см.$$

По (104в) определяем наибольшую допустимую ширину меди:

$$b\leqslant 0,5\left[\frac{\pi\ .\ 892,4}{68}-22,5-2\ .\ 0,5-4,6\right]=6,55\approx 6,5\ см.$$

С помощью (104d) находим:

$$a=1,15\left[6,5-\sqrt{6,5^2-1,73\frac{675}{100}}\right]=1,12\ см.$$

Так как, по § 14, $h_ш=27$ *см*, то по (105) находим:

$$w_e\leqslant\frac{0,96\ .\ 27-2\ .\ 1,5}{1,12+0,05}=19,5\approx 19.$$

При этом ток возбуждения и плотность тока по (105а):

$$I_e = \frac{57000}{2 \cdot 19} = 1500 \ a.$$

$$j_e = \frac{1500}{675} = 2{,}22 a/мм^2 .$$

По (105в) находим повышение температуры обмотки:

$$\vartheta_{cu2} \approx \frac{3(2{,}8+4{,}45) \cdot 6{,}5 \cdot 2{,}22^2}{1{,}6+\sqrt{44{,}4}} = 85°Ц.$$

По (106) и (107) получаем:

$$h_m = 1{,}04[2 \cdot 1{,}5+19(1{,}12+0{,}5)] = 26{,}3 \ см \approx 27 \ см;$$

$$l_e = 2[197-0{,}5 \cdot 22{,}5+1{,}57(22{,}5+0{,}8+6{,}5)] = 467 \ см.$$

По (108) ... (112) находим:

$$L_e = 68 \cdot 19 \cdot 467 = 603000 \ см;$$

$$G_{cu2} = 603000 \cdot 675 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} = 36300 \ кг;$$

$$R_{e95} = \frac{1{,}32 \cdot 603000}{5700 \cdot 975} = \frac{1{,}32 \cdot 1{,}96 \cdot 36300}{675^2} = 0{,}206 \ ома.$$

Запас и мощность возбуждения:

$$\kappa_o = \frac{350}{0{,}206 \cdot 1500} = 1{,}13.$$

$$P_{eN} = 350 \cdot 1500 \cdot 10^{-3} = 525 \ квт.$$

Пример 3. Приняв предварительно $U_e = 115$ *в*, находим по (99) и (100):

$$l_e = 2(46{,}5+11{,}5)+18 = 134 \ см.$$

$$q_e = 1{,}15 \frac{1{,}32 \cdot 134 \cdot 3 \cdot 17600}{5700 \cdot 115} = 16{,}5 \ мм^2 .$$

По таблице 8 выбираем проводник с асбестоновой изоляцией и с размерами:

$$\frac{a \times b}{a^1 \times b^1} = \frac{3{,}28 \times 5{,}1}{3{,}63 \times 5{,}45}; \quad q_e = 16{,}5 \ мм^2 .$$

С помощью эскиза, подобного рис. 13, находим размеры сечения катушки:

$$b_o = 5{,}7 \ см; \quad b_1 = 2{,}3 \ см;$$

$$h_o = 3 \ см; \quad h_1 = 5{,}8 \ см; \quad h_s = 3+6{,}7 = 9{,}7 \ см,$$

По (101) и (101а) получаем:

$$F=57\times30+\frac{(57+23)58}{2}=4030\ мм^2;$$

$$w_e\cong\frac{0,96\ .\ 4030}{(3,63+0,2)\ (5,45-0,2)}\ 179\approx175.$$

С помощью (102) и (102а) находим:

$$I_e=\frac{17600}{2\ .\ 175}=50,3\ a;$$

$$j_e=\frac{50,3}{16,5}=3,05\ a/мм^2.$$

По (103) определяем повышение температуры катушки возбуждения:

$$\vartheta_{cu2}\approx\frac{(2,8+1,42)\ .\ 17600\ .\ 3,05}{76\ .\ 9,7(1,6+\sqrt{32,7})}\left[1+\right.$$

$$\left.+\frac{0,035\left(\frac{57}{3,63}-0,5\right)\left(1,6+\sqrt{32,7}\right)}{2,8+1,42}\right]=81^\circ Ц<95\ .$$

Заметим, что, применив более сложную намотку проводника „на узкую сторону“, можно уменьшить перегрев обмотки до 68°Ц, так как коэффициент в квадратных скобках уменьшается с 1,94 до 1,60.

С помощью (103а), (108) ... (112) находим:

$$l_e=2(46,5+11,5)+6,28\ .\ 2,6=132\ см;$$

$$L_e=6\ .\ 175\ .\ 132=139000\ см;$$

$$G_{cu2}=139000\ .\ 16,5\ .\ 8,9\ .\ 10^{-5}=205\ кг;$$

$$R_{e95}=\frac{1,32\ .\ 139000}{5700\ .\ 16,5}=\frac{1,32\ .\ 1,96\ .\ 205}{16,5^2}=1,95\ ома;$$

$$K_o=\frac{115}{1,95\ .\ 50,3}=1,17;$$

$$P_e=115\ .\ 50,3\ .\ 10^{-3}=5,8\ квт.$$

С помощью формул, данных в приложении 1, определяем динамические реактивности и постоянные времени генератора:

$$a=\frac{22,5-11,5}{2}=5,5\ см;$$

$$d_t=4,6+0,55-\frac{22,5^2}{4\,.\,62,5}=3,13\ \text{см};$$

$$c_p=32,7-22,5-\frac{6,28\,.\,3,13}{6}=7\ \text{см};$$

$$\lambda_{pl}=1,4\left(\frac{3,13}{7}-0,25\right)+0,55\left(\frac{5,5}{7}+0,2\right)-$$
$$-0,4\left(\frac{5,5}{7}-0,5\right)^2=1,4(0,447-0,25)+0,55(0,785+0,2)-$$
$$-0,4(0,785-0,5)^2=1,4\,.\,0,197+0,55\,.\,0,985-$$
$$-0,4\,.\,0,285^2=0,784; \qquad (А)$$

$$\lambda_{ml}=\frac{0,55\,.\,10,5}{32,7-11,5-\frac{\pi}{6}(10,5+2\,.\,4,6+2\,.\,0,55)}=0,56; \qquad (Б)$$

$$\lambda_{mb}=0,37\frac{11,5}{46,5}=0,092; \qquad (В)$$

$$\lambda=0,784+\frac{0,56}{1,53}+\frac{0,092}{2,65}\cong 1,12;$$

$$X_f\approx 1,05\,.\,1\left[1+\frac{2\,.\,8600\,.\,46,5\,.\,1,12}{7,1\,.\,10^6}\right]=1,185\ \partial/e\partial; \qquad (1)$$

$$x_f=X_f-x_{ad}=1,185-1=0,185\ \partial/e\partial; \qquad (2)$$

$$x'_d=0,049+\frac{1\,.\,0,185}{1+0,185}=0,205\ \partial/e\partial; \qquad (3)$$

$$x'_q=x_q=0,67\ \partial/e\partial; \qquad (4)$$

$$x_{kd}=5,1\frac{8200}{2\,.\,7,1\,.\,10^6}\left[\frac{\left(1,7+2,8\frac{2,5}{2,5}\right)\cdot 46,5}{7}+\frac{62,5}{4\,.\,3}\right]=$$
$$=0,104\ \partial/e\partial; \qquad (5)$$

$$x_{kq}=0,75\,.\,0,104=0,078\ \partial/e\partial; \qquad (6)$$

$$x''_d=0,049+\frac{0,104(0,205-0,049)}{0,104+0,205-0,049}=0,112\ \partial/e\partial; \qquad (7)$$

$$x''_q=0,049+\frac{0,078\,.\,0,62}{0,078+0,12}=0,118\ \partial/e\partial; \qquad (9)$$

$$x_2=\sqrt{0,112\,.\,0,118}=0,115\ \partial/e\partial; \qquad (11)$$

$$x_o=\frac{8,3\ .\ 46,5\ .\ 8200}{0,962^2\ .\ 3\ .\ 4\ .\ 2\ .\ 7,1\ .\ 10^6}\left[\ (0,962-0,555)\ \frac{74}{11,5}+\right.$$

$$\left.+(3\ .\ 0,962-2)\frac{3}{11,5}\right]+0,45\ \frac{8200\ .\ (3\ .\ 0,962-2)}{8600\ .\ 0,962^2}\left[\left(\frac{1}{3\ .\ 4}\right)^2+\right.$$

$$\left.+0,39\left(0,962-\frac{2}{3}\right)-\left(0,962-\frac{2}{3}\right)^2+0,037\right]=0,086\ \partial/e\partial; \quad (14)$$

$$r_f=\frac{3700\ .\ 8200\ .\ 132}{50\ .\ 2\ .\ 7,1\ .\ 10^6\ .\ 175\ .\ 16,5}=0,00195\ \partial/e\partial; \quad (16)$$

$$r_{kd}=\frac{35500\ .\ 8200}{50\ .\ 2\ .\ 7,1\ .\ 10^6}\left[\frac{1\ .\ 50,5}{7\ .\ 113}+\frac{0,2\ .\ 62,5\ .\ 1}{3\ .\ 400}\right]=$$

$$=0,069\ \partial/e\partial; \quad (17)$$

$$r_{kq}=\frac{26600\ .\ 8200}{50\ .\ 2\ .\ 7,1\ .\ 10^6}\left[\frac{1\ .\ 50,5}{7\ .\ 113}+\frac{0,4\ .\ 62,5\ .\ 1}{3\ .\ 400}\right]=$$

$$=0,111\ \partial/e\partial; \quad (18)$$

$$T'_{do}=\frac{1,185}{0,00195}=608\ \text{эл. рад}; \quad (20)$$

$$T'_{co}=\frac{1+0,104}{0,069}=16\ \text{эл. рад}; \quad (21)$$

$$T'_{qo}=\frac{0,62+0,078}{0,111}=6,35\ \text{эл. рад}; \quad (22)$$

$$T'_d=\frac{0,205\ .\ 608}{1,05}=119\ \text{эл. рад}; \quad (23)$$

$$T''_{do}=\frac{0,104\ .\ 0,185+0,104\ .\ 1+1\ .\ 0,185}{0,069(0,185+1)}=$$

$$=3,77\ \text{эл. рад}; \quad (24)$$

$$T''_d=\frac{0,112\ .\ 3,77}{0,205}=2,06\ \text{эл. рад}; \quad (25)$$

$$T''_q=\frac{0,118\ .\ 6,35}{0,67}=1,12\ \text{эл. рад}; \quad (26)$$

$$T_a=\frac{0,115}{0,0089}=13\ \text{эл. рад}; \quad (27)$$

$$x'_{dN}=0,88\ .\ 0,205=0,180\ \partial/e\partial;$$

$$x''_{dN}=0,88\ .\ 0,112=0,099\ \partial/e\partial;$$

$$x''_{qN}=0,88\ .\ 0,118=0,104\ \partial/e\partial.$$

§ 20. Потери и коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке

1. Потери в обмотке статора

$$Q_{cu1}=3R_{eff}I^2_N\ ,\ 10^{-3}\ \text{квт}. \tag{113}$$

Здесь: R_{eff} — активное сопротивление фазы обмотки статора при 75°Ц (§11).

Заметим, что потери в обмотке статора в *квт* равны также номинальной мощности машины P_N в *киловольтамперах*, умноженной на активное сопротивление фазы статора в долях единицы R'_{eff} (§ 11), т. е.:

$$Q_{cu1}=P_NR'_{eff}\ \text{квт}. \tag{113a}$$

Переходя к определению потерь в стали, заметим, что в заводской практике, в соответствии с ГОСТ, при расчёте кпд синхронной машины за потери в стали при номинальной нагрузке принимают потери, вычисленные для холостого хода (или полученные из опыта холостого хода). Ввиду того, что внутренняя эдс (а следовательно, поток и индукции) при нагрузке превышают эдс при холостом ходе на 10÷15 и даже на 20% (например, в некоторых синхронных компенсаторах), правильнее рассчитывать потери в стали для действительной величины эдс, как показано ниже.

2. Потери в стали зубцов статора [Л. 9]

$$Q_z=G_zC_z\left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}\cdot\left(\frac{B_{zmN}}{10000}\right)^2 .\ 10^{-3}\ \text{квт}. \tag{114}$$

Здесь: G_z — вес зубцов в *кг.* (§ 10);
f — частота;
C_z = 4,5 для средне-легированной электротехнической стали;[1]
C_z = 5,6 для нормальной электротехнической стали;

---

[1] **Для высоколегированной стали C_z=2,8.**

B_{zmN} — средняя индукция в зубцах при номинальной нагрузке, равная:

$$B_{zmN}=B_{zmo}\frac{E_i}{U_N};\qquad (114a)$$

B_{zmo} — средняя индукция в зубцах при холостом ходе (§ 17);

$\frac{E_i}{U_N}$ отношение внутренней эдс при номинальной нагрузке к номинальному напряжению (§ 18).

3. Потери в стали сердечника статора [Л. 9]

$$Q_a=C_aG_a\left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}\cdot\left(\frac{B_{aN}}{10000}\right)^2 10^{-3}\ \text{квт}.\qquad (115)$$

Здесь: G_a — вес сердечника статора в *кг.* (§ 10);

f — частота;

$C_a=3{,}4$ для средне-легированной электротехнической стали;[1]

$C_a=4{,}3$ для нормальной электротехнической стали;

B_{aN} — индукция в сердечнике статора при номинальной нагрузке, равная:

$$B_{aN}=B_{ao}\frac{E_i}{U_N};\qquad (115a)$$

B_{ao} индукция в сердечнике статора при холостом ходе (§ 17);

$\frac{E_i}{U_N}$ — по (96), § 18.

4. Потери на возбуждение

Для машин с независимым возбуждением:

$$Q_e=(R_{e95}I^2{}_e+2I_e)10^{-3}\ \text{квт}.\qquad (116)$$

Здесь: R_{e95} — сопротивление обмотки возбуждения при 95°Ц (§ 19);

I_e ток возбуждения при номинальной нагрузке (§ 19);

---

[1] Для высоколегированной стали $C_a=2{,}2$.

2 — падение напряжения под щетками на контактных кольцах, в *вольтах*.

Для машин с пристроенным возбудителем:

$$Q_e = \frac{(R_{e95} I^2{}_e + 2I_e) \cdot 10^{-3}}{\eta_{1e}} \text{ квт.} \qquad (116a)$$

Здесь: η_{1e} — коэффициент полезного действия возбудителя, равный от 0,75 до 0,85.

5. Механические потери (в подшипниках и на вентиляцию) [Л. 9]

Для машин с горизонтальным валом:

$$Q_R = 1{,}83\ 2p \left(\frac{v}{40}\right)^3 \sqrt{l_t} \text{ квт.} \qquad (117)$$

Здесь: $2p$ — число полюсов (§ 1);

v — окружная скорость ротора в *м/сек.* (§ 2);

l_t — длина стали статора в *метрах* (§ 8).

Для машин с вертикальным валом:

$$Q_R = 0{,}4 \cdot D^3{}_i \left(\frac{n}{100}\right)^2 \sqrt{l_t} \text{ квт.} \qquad (117a)$$

Здесь: D_i — диаметр статора в *метрах* (§ 2);

n — число оборотов в *минуту*;

l_t — длина стали статора в *метрах* (§ 8).

6. Добавочные потери

При эскизном проектировании добавочные потери можно принять в машинах до 100 *ква* равными 0,5%, а в машинах более 100 *ква* — равными 0,25% от номинальной их мощности P_N в *киловольтамперах*, т. е.

$$Q_{доб} = (0{,}005 \text{ или } 0{,}0025) \cdot P_N \text{ квт.} \qquad (118)$$

Сумма потерь:

$$\Sigma Q = Q_{cu1} + Q_z + Q_a + Q_e + Q_R + Q_{доб} \text{ квт.} \qquad (119)$$

Коэффициент полезного действия генератора:

$$\eta_{1г} = \frac{P_N \cos\varphi_N}{P_N \cos\varphi_N + \Sigma Q} = 1 - \frac{\Sigma Q}{P_N \cos\varphi_N + \Sigma Q}. \qquad (120)$$

Коэффициент полезного действия двигателя:

$$\eta_{двиг}=\frac{P_N \cos\varphi_N-\Sigma Q}{P_N \cos\varphi_N}=1-\frac{\Sigma Q}{P_N \cos\varphi_N}. \qquad (121)$$

Пример 1. По (113) ... (120) находим:

$$Q_{cu1}=3 \cdot 0{,}0522 \cdot 115^2 \cdot 10^{-3}=2{,}08 \text{ квт};$$

$$Q_z=4{,}5 \cdot 57\left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot \left(\frac{11300}{10000} \cdot 1{,}12\right)^2 \cdot 10^{-3}=0{,}41 \text{ квт};$$

$$Q_a=3{,}4 \cdot 132\left(\frac{10600}{10000} \cdot 1{,}12\right)^2 \cdot 10^{-3}\cong 0{,}63 \text{ квт};$$

$$Q_e=\frac{(0{,}613 \cdot 49{,}3^2+2 \cdot 49{,}3) \cdot 10^{-3}}{0{,}75}\approx 2{,}12 \text{ квт};$$

$$Q_R=1{,}83 \cdot 6\left(\frac{23{,}6}{40}\right)^3 \cdot \sqrt{0{,}18}=0{,}96 \text{ квт};$$

$$Q_{доб}=0{,}005 \cdot 80=0{,}40 \text{ квт};$$

$$\Sigma Q=2{,}08+0{,}41+0{,}63+2{,}12+0{,}96+0{,}40=6{,}6 \text{ квт};$$

$$\eta_{\iota z}=1-\frac{6{,}6}{80 \cdot 0{,}8+6{,}6}=0{,}907.$$

Пример 2. По (113) ... (121) находим;

$$Q_{cu1}=3 \cdot 0{,}0076 \cdot 3770^2 \cdot 10^{-3}=90000 \cdot 0{,}0036=324 \text{ квт};$$

$$Q_z=4{,}5 \cdot 40500 \cdot \left(\frac{1{,}09 \cdot 16800}{10000}\right)^2 \cdot 10^{-3}=610 \text{ квт};$$

$$Q_a=3{,}4 \cdot 50500\left(\frac{1{,}09 \cdot 11900}{10000}\right)^2 \cdot 10^{-3}=290 \text{ квт};$$

$$Q_e=\frac{(0{,}206 \cdot 1500^2+2 \cdot 1500)10^{-3}}{0{,}8}=580 \text{ квт};$$

$$Q_R=0{,}4 \cdot 9{,}6^3\left(\frac{88{,}2}{100}\right)^2\sqrt{1{,}97}=385 \text{ квт};$$

$$Q_{доб}=0{,}0025 \cdot 90000=225 \text{ квт};$$

$$\Sigma Q=324+610+290+580+385+225\cong 2414 \text{ квт};$$

$$\eta_{\iota z}=\frac{90000 \cdot 0{,}9}{90000 \cdot 0{,}9+2414}=1-\frac{2414}{83414}=0{,}971.$$

Пример 3. По (113) ... (120) находим:

$$Q_{cu1}=3 \cdot 0{,}00259 \cdot 793^2 \cdot 10^{-3}=550 \cdot 0{,}0089=4{,}90 \text{ квт};$$

$$Q_z = 4,5 \cdot 275\left(\frac{6650 \cdot 1,92 \cdot 1,05}{10000}\right) \cdot 10^{-3} = 2,23\ квт;$$

$$Q_a = 3,4 \cdot 613\left(\frac{12200 \cdot 1,05}{10000}\right)^2 \cdot 10^{-3} = 3,40\ квт;$$

$$Q_e = \frac{(1,95 \cdot 50,3^2 + 2 \cdot 50,3)10^{-3}}{0,75} \cong 6,8\ квт;$$

$$Q_R = 1,83 \cdot 6 \cdot \left(\frac{32,7}{40}\right)^2 \sqrt{0,465} \approx 5\ квт;$$

$$Q_{доб} \cong 0,0025 \cdot 550 = 1,38\ квт;$$

$$\Sigma Q = 4,9 + 2,23 + 3,40 + 6,8 + 5 + 1,38 = 23,7\ квт;$$

$$\eta_г = 1 - \frac{23,7}{550 \cdot 0,8 + 23,7} = 0,949.$$

§ 21. Сводка весов активных материалов

Веса меди

Обмотка статора G_{cu1} (§ 11).
Обмотка возбуждения G_{cu2} (§ 19). (122)
Стержни демпферной клетки G_b (§ 14).
Короткозамыкающие сегменты G_r (§ 14).
Полный вес меди ΣG_{cu} *кг*. (123)
Удельный расход меди:

$$g_{cu} = \frac{\Sigma G_{cu}}{P_N}\ кг/ква. \tag{124}$$

Веса стали

Зубцы статора G_z (§ 10).
Сердечник статора G_a (§ 10).
Полюса G_m (§ 14). (125)
Ярмо (обод) ротора G_j (§ 15).
Полный вес активной стали:

$$\Sigma G_{Fe}\ кг. \tag{126}$$

Удельный расход активной стали (включая обод):

$$g_{Fe} = \frac{\Sigma G_{Fe}}{P_N}\ кг/ква. \tag{127}$$

Пример 1. По (122) ... (127) находим:

Веса меди: $G_{cu1} = 39$ *кг.*
$G_{cu2} = 75$ »
$\Sigma G_{cu} = 114$ *кг.*

Веса стали: $G_z = 57$ *кг.*
$G_a = 132$ »
$G_m = 90$ »
$\Sigma G_{Fe} = 279$ *кг.*

$$g_{cu} = \frac{114}{80} = 1{,}43 \text{ кг/ква};$$

$$g_{Fe} = \frac{279}{80} = 3{,}5 \text{ кг/ква}.$$

Пример 2. По (122) ... (127) получаем:

$G_{cu1} = 16100$ *кг.*
$G_{cu2} = 36300$ »
$G_b = 2530$ »
$G_r = 1230$ »
$\Sigma G_{cu} = 56160$ *кг.*

$G_z = 40500$ *кг.*
$G_a = 50500$ »
$G_m = 72700$ »
$G_j = 242000$ »
$\Sigma G_{Fe} = 406000$ *кг.*

$$g_{cu} = \frac{56160}{90000} = 0{,}623 \text{ кг/ква};$$

$$g_{Fe} = \frac{406000}{90000} = 4{,}5 \text{ кг/ква}.$$

Пример 3. По (122) ... (127) получаем:

$G_{cu1} = 177$ *кг.*
$G_{cu2} = 205$ »
$G_b = 23$ »
$G_k = 15{,}5$ »
$\Sigma G_{cu} \approx 420$ *кг.*

$G_z = 275$ *кг.*
$G_a = 613$ »
$G_m = 420$ »
$\Sigma G_{Fe} \approx 1308$ *кг.*

$$g_{cu} = \frac{420}{550} = 0{,}76 \text{ кг/ква};$$

$$g_{Fe} = \frac{1308}{550} = 2{,}37 \text{ кг/ква}.$$

§ 22. Проверка нагревания машины

Согласно ГОСТ, повышение температуры обмоток статора и ротора, имеющих изоляцию класса *B*, должно быть не более 65°Ц, а однослойных обмоток ротора со слюдяной и асбестоновой изоляцией — не более 95°Ц над температурой окружающей среды.

Повышение температуры стали статора над температурой входящего воздуха можно определить по формуле [Л. 9]:

$$\vartheta_{Fe}=\frac{125}{1+0{,}1v}\left[\frac{(Q_z+Q_a)10^3}{\pi D_i l_t}+\frac{AS\,.\,j_a}{4100}\right]{}^\circ Ц. \qquad (128)$$

Здесь: v — окружная скорость ротора в *м/сек.* (§ 2);
Q_z и Q_a — потери в стали статора в *квт* (§ 20);
D_i и l_t — диаметр и длина статора в *см* (§§ 2 и 8);
AS и j_a — по §§ 3 и 6.

Повышение температуры меди обмотки статора над температурой входящего воздуха:

$$\vartheta_{cu1}\cong\vartheta_{Fe}+\vartheta_i \qquad (129)$$

Здесь: ϑ_i — перепад температуры в изоляции обмотки статора (§ 6).

Повышение температуры меди обмотки возбуждения над температурой входящего воздуха ϑ_{cu2} определено в § 19.

Пример 1. По (128) и (129) находим:

$$\vartheta_{Fe}=\frac{125}{1+0{,}1\,.\,23{,}6}\left[\frac{(0{,}41+0{,}63)\,.\,10^3}{\pi\,.\,45\,.\,18}+\frac{308\,.\,4{,}68}{4100}\right]=28{,}2\approx28^\circ Ц.$$

$\vartheta_{cu1}=28+10=38^\circ\approx40^\circ Ц$; $\vartheta_{cu2}\cong38^\circ Ц$ (§ 19).

Пример 2. По (128) и (129) находим:

$$\vartheta_{Fe}=\frac{125}{1+0{,}1\,.\,44{,}4}\left[\frac{(610+290)\,.\,10^3}{\pi\,.\,960\,.\,197}+\frac{600\,.\,2{,}65}{4100}\right]\cong44^\circ Ц.$$

$\vartheta_{cu1}=44+23{,}4\approx67^\circ Ц$; $\vartheta_{cu2}=85^\circ Ц$ (§ 19)

Пример 3. По (128) и (129) находим:

$$\vartheta_{Fe}=\frac{125}{1+0{,}1\,.\,32{,}7}\left[\frac{(2{,}23+3{,}40)\,.\,10^3}{\pi\,.\,62{,}5\,.\,46{,}5}+\frac{387\,.\,3{,}34}{4100}\right]\cong28^\circ Ц.$$

$\vartheta_{cu1}\cong28+9\approx37^\circ Ц$;

$\vartheta_{cu2}=81^\circ Ц$. (§ 19).

§ 23. Количество охлаждающего воздуха

$$Q' \approx \frac{\Sigma Q}{1{,}1\vartheta_a} \text{ м/сек.} \tag{130}$$

Здесь: ΣQ — сумма потерь в *квт* (§ 20);

ϑ_a — повышение температуры воздуха, которое можно принять от 20 до 25°Ц.

Пример 1.

$$Q' = \frac{6{,}6}{1{,}1(20 \div 25)} = 0{,}3 \div 0{,}24 \text{ м}^3\text{/сек.}$$

Пример 2.

$$Q' = \frac{2414}{1{,}1(20 \div 25)} = 110 \div 90 \text{ м}^3\text{/сек.}$$

Пример 3.

$$Q' = \frac{23{,}7}{1{,}1(20 \div 25)} = 0{,}86 \div 1{,}1 \text{ м}^3\text{/сек.}$$

§ 24. Некоторые механические расчёты [Л. 1]

1. Диаметр шейки вала со стороны привода

$$d_z = C\sqrt[3]{\frac{P_N \cos\varphi_N}{n_N}} \text{ см,} \tag{131}$$

где P_N — номинальная мощность в *ква*.

Для нормальной валовой стали $C=16$.

(Для сталей повышенного качества $C=14$ до 12).

Значение d_z, полученное по (131), округлить в третьей значащей цифре до 5 или до 0.

Диаметр шейки вала со стороны, противоположной приводу:

$$d'_z \approx 0{,}75 d_z \text{ см.} \tag{132}$$

2. Корпус статора. Основные размеры и конструктивные данные корпуса определены в § 9.

3. Полюсные болты. В конструкциях ротора по рис. 12 полюсы крепятся к центральной втулке A обычно при помощи сквозных болтов с конусными головками, утопленными в поверхность полюсных наконечников. В конструкциях по рис. 8 и 14 — при помощи болтов, пропущен-

ных через обод ротора. При шихтованной втулке и при шихтованном ободе крепление полюсов производится обычно (но не всегда) с помощью хвостов стандартных размеров.

Расчет полюсных болтов производится следующим образом.

Вес одного полюса с обмоткой, демпферной клеткой, нащёчинами и изоляцией (см. §§ 14, 19 и 21):

$$G_o \approx 1{,}15 \frac{G_m + G_{cu2} + G_b + G_r}{2p} \text{ кг.} \qquad (133)$$

Радиус R_o центра тяжести полюса (в *метрах*) для конструкции ротора по рис. 12:

$$R_o \approx 0{,}36 \cdot 10^{-2} \sqrt{(D_i - 2\delta)^2 + D_j^2} \text{ м.} \qquad (134)$$

Здесь: D_i, 2δ и D_j в *см* (см. §§ 2, 12, 15).

Радиус центра тяжести полюса (в *метрах*) для конструкции ротора по рис. 8 и 14 (при $2p > 8$):

$$R_o \approx \frac{(D_i - 2\delta) + D_j}{4 \cdot 100} \text{ м.} \qquad (135)$$

Здесь: D_i, 2δ и D_j в *см*, (см. §§ 2, 12 и 15).

Центробежная сила одного полюса при угонной скорости:

$$F_o = \frac{G_o}{9{,}81} R_o \left[\frac{k_y \cdot 2\pi \cdot n_N}{60}\right]^2 \text{ кг.} \qquad (136)$$

Здесь: k_y и n_N — по заданию;
G_o — по (133);
R_o — по (134) или (135).

Полная сила, действующая на полюс в нижнем его положении (для машин с горизонтальным валом):

$$F = F_o + G_o \text{ кг.} \qquad (137)$$

Диаметр полюсных болтов следует определять (округляя результат до ближайшего нормального размера) по формуле:

$$d \approx (0{,}2 \div 0{,}25) b_m \text{ см,} \qquad (138)$$

Здесь: b_m — ширина полюса в *см* (§ 14).

Таблица нормальных болтов „*М*" (размеры в *мм*):

d	4	5	6	8	10	12	16	20	24	30	36	42	48
h	2,8	3,5	5	6	7	9	11	14	16	20	24	28	32
D	9,2	10,4	12,7	16,2	19,6	25,4	31,2	36,9	41,6	53,1	63,5	75,5	86,5
S	8	9	11	14	17	22	27	32	36	46	55	65	75

Здесь: d — диаметр стержня болта в *мм*;
h — высота головки;
D — диаметр описанной окружности головки;
S — диаметр вписанной окружности головки.

Диаметр полезного сечения болта (по основанию нарезки):

$$d_1 \approx 0,85d \text{ см.} \tag{139}$$

Полезное поперечное сечение болта (по основанию нарезки):

$$q_0 = \frac{\pi}{4}(0,85 \cdot d)^2 \approx 0,57 \cdot d^2 = 0,785 d_1^2 \text{ см}^2. \tag{140}$$

Количество болтов N на один полюс (с округлением до ближайшего большего числа):

$$N \approx \frac{F}{q_0 \cdot \sigma}. \tag{141}$$

Здесь: F — по (137);
q_0 — по (140);
$\sigma \approx 1000$ *кг/см²* — допустимое напряжение для машин с $k_y = 1,2$;
$\sigma \approx 1200 \div 1500$ *кг/см²* — для гидрогенераторов с высокой угонной скоростью, при применении специальной стали.

4. Проверка прочности обода для конструкции рис. 8 или 14, без учёта влияния спиц (проверка прочности шихтованного обода или центральной втулки по рис. 12 требует более сложных расчётов и здесь не приводится).

Ослабление сечения обода болтовыми отверстиями учитывается коэффициентом:

$$k_0 = \frac{l_j - 1,03dN}{l_j}. \tag{142}$$

Здесь: l_j — длина обода в *см* (§ 15);
N — по (141).

Напряжения в ободе от центробежных сил собственной массы обода:

$$\sigma_e \approx \gamma \frac{\left(k_y \dfrac{\pi D_j \cdot n_N}{60 \cdot 100}\right)^2}{98,1 \cdot k_0} \text{ кг/см}^2. \tag{143}$$

Здесь: k_y и n_N — по заданию;
D_j — в *см* (§ 15), рис. 8 и 14;
k_0 — по (142);

γ — удельный вес материала (для стали и чугуна следует принимать $\gamma \approx 7{,}8$).

Разрывающее усилие, возникающее в сечении обода под влиянием центробежной силы полюсов:

$$F_s \approx \frac{2p \cdot F_0}{2\pi}\ кг. \qquad (144)$$

Здесь: F_0 — по (136);

$2p$ — число полюсов.

Напряжение в ободе от силы F_s:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{k_0 h_j l_j}\ кг/см^2. \qquad (145)$$

Здесь: k_0 — по (142);

h_j и l_j — в *см* (§ 15), рис. 8 и 14.

Суммарное напряжение в ободе:

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_s\ кг/см^2. \qquad (146)$$

Допустимые значения σ:

для стали - 600 ÷ 800 *кг/см²*

для чугуна - 120 ÷ 150 *кг/см²*.

Пример 1. По (131), (132), (133) и (134) находим:

$$d_z = 16 \sqrt[3]{\frac{80 \cdot 0{,}8}{1000}} = 6{,}4 \approx 6{,}5\ см.$$

$$d'_z \cong 0{,}75 \cdot 6{,}5 = 4{,}9 \cong 5\ см.$$

$$G_0 \cong 1{,}15 \frac{90+75}{6} = 31{,}5 \approx 32\ кг.$$

$$R_0 \approx 0{,}36 \cdot 10^{-2} \sqrt{(45-2 \cdot 0{,}3)^2 + 18^2} \approx 0{,}17\ метра.$$

Далее, по (136) ... (141) получаем:

$$F_0 = \frac{32 \cdot 0{,}17}{9{,}81} \left(\frac{1{,}2 \cdot 2\pi \cdot 1000}{90} \right)^2 \approx 8900\ кг.$$

$$F = 8900 + 32 \cong 8930\ кг.$$

$$d \approx 0{,}25 \cdot 7{,}5 = 1{,}87\ см.$$

По таблице принимаем $d = 2$ *см*.

$$d' \approx 0{,}85 \cdot 2 = 1{,}7\ см.$$

$$q_0 = 0{,}57 \cdot 2^2 = 0{,}785 \cdot 1{,}7^2 = 2{,}28\ см^2.$$

Количество болтов:

$$N \approx \frac{8930}{2{,}28 \cdot 1000} = 3{,}9 \approx 4 \text{ штуки.}$$

Пример 2.

Диаметр шейки вала по (131), приняв $C=14$:

$$d_z = 14 \sqrt[3]{\frac{90000 \cdot 0{,}9}{88{,}2}} = 134 \approx 135 \ см.$$

$$d'_z \approx 0{,}75 \cdot 135 \cong 100 \ см.$$

Далее, по (133) ... (141) находим:

$$G_o \approx 1{,}15 \frac{72700+36300+2530+1230}{68} \approx 1910 \ кг;$$

$$R_o = \frac{960 - 1{,}8 \cdot 2 + 892{,}4}{4 \cdot 100} = 4{,}62 \ м;$$

$$F_o = \frac{1910}{9{,}81} \ 4{,}62 \left[\frac{2{,}6 \cdot 2\pi \cdot 88{,}2}{60}\right]^2 = 515000 \ кг;$$

или на 1 погонный сантиметр длины полюса:

$$f_o = \frac{F_o}{l_t} = \frac{515000}{197} = 2620 \ кг/см.$$

В соответствии с этой величиной подбираются количество и размеры стандартных хвостов полюса [Л. 1].

Пример 3. По (131) ... (134) находим:

$$d_z = 16 \sqrt[3]{\frac{550 \cdot 0{,}8}{1000}} = 10{,}6 \approx 11 \ см;$$

$$d'_z \cong 0{,}75 \cdot 11 = 8{,}3 \approx 8{,}5 \ см;$$

$$G_o \approx 1{,}15 \frac{420+205+23+15{,}5}{6} \approx 128 \ кг;$$

$$R_o \cong 0{,}36 \cdot 10^{-2} \sqrt{(62{,}5-2 \cdot 0{,}55)^2 + 31{,}2^2} = 0{,}25 \ м;$$

$$F_o = \frac{128}{9{,}81} \ 0{,}25 \left[\frac{1 \cdot 2 \cdot 2\pi \cdot 1000}{60}\right]^2 = 51200 \ кг.$$

или на один погонный сантиметр длины полюса:

$$f_o = \frac{F_o}{l_t} = \frac{51200}{46{,}5} = 1100 \ кг/см.$$

В соответствии с этой величиной подбираются количество и размеры стандартных хвостов полюса [Л. 1.].

Приложение 1

ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕАКТИВНОСТИ И ПОСТОЯННЫЕ ВРЕМЕНИ ЯВНОПОЛЮСНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Динамические параметры синхронной машины требуются для расчета переходных режимов и определяются следующим образом [Л. 9].

Полная реактивность обмотки возбуждения:

$$X_f \cong 1{,}05 x_{ad} \left(1 + \frac{2 \cdot AW_{\delta o} \cdot l_t \lambda}{\Phi_o}\right) \ \partial/e\partial. \qquad (1)$$

Здесь: $AW_{\delta o}$ и Φ_o по §§ 13 и 7;

$$\lambda = \lambda_{pl} + \frac{\lambda_{ml}}{1{,}53} + \frac{\lambda_{mb}}{2{,}65} \quad \text{(см. рис. 15)};$$

$$\lambda_{pl} = 1{,}4\left(\frac{d_t}{c_p} - 0{,}25\right) + 0{,}55\left(\frac{a}{c_p} + 0{,}2\right) - 0{,}4\left(\frac{a}{c_p} - 0{,}5\right)^2, \qquad (A)$$

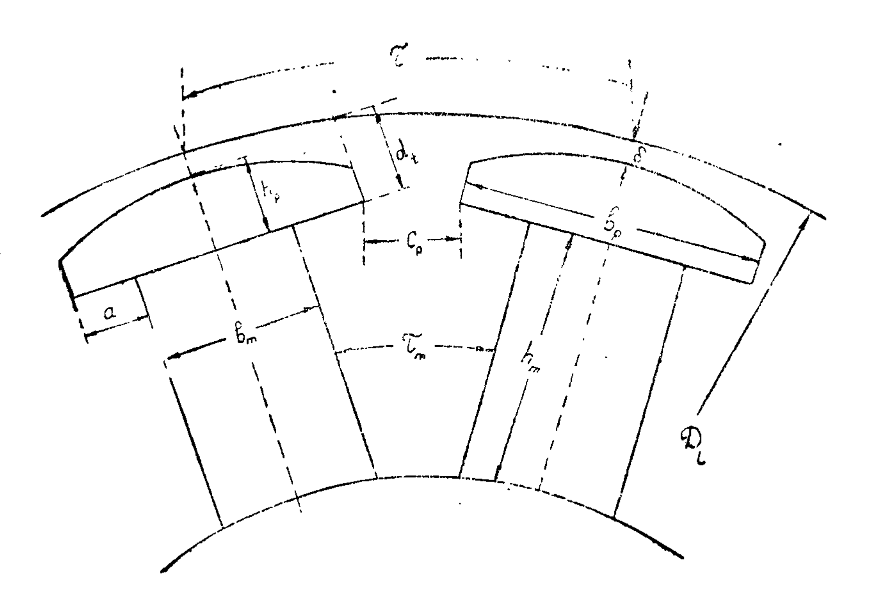


Рис. 15. Эскиз размеров полюса и междуполюсного окна

причем: $c_p = \tau - b_p - \frac{2\pi d_t}{2p}$, (см. рис. 15)

$$a = \frac{b_p - b_m}{2},$$

$$d_t = h_p + \delta - \frac{b_p^2}{4D_i},$$

а при $\frac{d_t}{c_p} < 0,25$ первым членом пренебрегают;

$$\lambda_{ml} = \frac{0,55 \cdot h_m}{\tau - b_m - \frac{\pi}{2p}(h_m + 2h_p + 2\delta)}; \qquad (Б)$$

$$\lambda_{mb} = 0,37 \frac{b_m}{l_t}. \qquad (В)$$

В (А), (Б) и (В) и на рис. 15 все размеры в *см*.

Реактивность рассеяния обмотки возбуждения:

$$x_f = X_f - x_{ad} \text{ о/ед.} \qquad (2)$$

Продольная переходная реактивность:

$$x^1_d = x_d - \frac{x^2_{ad}}{X_f} = x_l + \frac{x_{ad} x_f}{x_{ad} + x_f} \text{ о/ед.} \qquad (3)$$

Поперечная переходная реактивность:

$$x^1_q = x_q. \qquad (4)$$

Продольная реактивность рассеяния демпферной клетки (при круглых стержнях):

$$x_{kd} = 5,1 \frac{AW_A}{2\Phi_0} \left[\frac{\left(1,7 + 2,8 \frac{h_{s2}}{b_{s2}}\right) l_t}{B} + \frac{D_i}{4p} \right] \text{о/ед.} \qquad (5)$$

Здесь: AW_A и Φ_0 — по §§ 13 и 7;

h_{s2} b_{s2} — высота и ширина шлица круглого паза демпферной клетки;

B — число стержней демпферной клетки на полюс.

Поперечная реактивность рассеяния демпферной клетки:

а) $x_{kq}=0{,}75 \cdot x_{kd}$ для демпферной клетки с полными короткозамыкающими кольцами

в) $x_{kq}=2x_{kd}$ для демпферной клетки с короткозамыкающими сегментами. (6)

Продольная сверхпереходная реактивность:

а) $x''_d=x_l+\frac{x_{kd}(x_d'-x_l)}{x_{kd}+x'_d-x_l}$ $д/ед$ — при наличии демпферной клетки; (7)

в) $x''_d=x'_d$ $д/ед$ — при отсутствии демпферной клетки. (8)

Поперечная сверхпереходная реактивность:

а) $x''_q=x_l+\frac{x_{kq}\cdot x_{aq}}{x_{kq}+x_{aq}}$ $д/ед$ — при наличии демпферной клетки; (9)

в) $x''_q=x'_q=x_q$ $д/ед$ — при отсутствии демпферной клетки. (10)

Реактивность отрицательной последовательности:

а) при работе синхронной машины на малое внешнее сопротивление:

$$x_2=\sqrt{x''_d\cdot x''_q}\ д/ед; \quad (11)$$

в) при работе машины на большое внешнее реактивное сопротивление:

$$x_2\approx\frac{x''_d+x''_q}{2}; \quad (12)$$

с) при неподвижном состоянии машины:

$$x_2\approx\frac{2x''_d\cdot x''_q}{x''_d+x''_q}. \quad (13)$$

Реактивность нулевой последовательности для синхронных машин с открытыми пазами при сокращении шага обмотки β, удовлетворяющим условию:

$$2/3\leqslant\beta\leqslant1$$

а) для синхронных машин с демпферной клеткой:

$$x_o = \frac{8{,}3 \cdot l_t \cdot AW_A}{f^2_\beta \cdot 3q\, 2\Phi_o}\left[(\beta - 0{,}555)\frac{h_п}{b_п} + (3\beta - 2)\frac{h_k}{b_п}\right] +$$

$$+ 0{,}45\frac{AW_A(3\beta - 2)}{AW_{\delta o} f^2_\beta}\left[\left(\frac{1}{3q}\right)^2 + 0{,}39\left(\beta - \frac{2}{3}\right) - \left(\beta - \frac{2}{3}\right)^2 +\right.$$

$$\left. + 0{,}037\right] \partial/ed. \qquad (14)$$

Здесь: $h_п$, h_k, $b_п$ по рис. 7.

в) для синхронных машин без демпферной клетки:

$$x_o = \frac{8{,}3 \cdot l_t \cdot AW_A}{f^2_\beta \cdot 3q \cdot 2\Phi_o}\left[(\beta - 0{,}555)\frac{h_п}{b_п} + (3\beta - 2)\frac{h_k}{b_п}\right] +$$

$$+ 0{,}9\frac{AW_A(3\beta - 2)}{AW_{\delta o} \cdot f^2_\beta}\left[\left(\frac{1}{3q}\right)^2 + 0{,}39\left(\beta - \frac{2}{3}\right) - \left(\beta - \frac{2}{3}\right)^2 +\right.$$

$$\left. + 0{,}037\right] \partial/ed. \qquad (15)$$

Активное сопротивление обмотки возбуждения, приведенное к обмотке статора и выраженное в долевых значениях (в долях сопротивления $\frac{U_ф}{I_ф}$):

$$r_f = \frac{3330 \cdot AW_A \cdot k^2_{ad} \cdot l_e}{f \cdot 2\Phi_o \cdot w_e \cdot q_e} \approx \frac{3700 \cdot AW_A \cdot l_e}{f \cdot 2\Phi_o \cdot w_e \cdot q_e} \partial/ed. \qquad (16)$$

Здест: f — частота,

l_e — средняя длина витка обмотки возбуждения в *см* (§ 19);

w_e, q_e — число витков на полюс и сечение витка обмотки возбуждения в *мм*² (§ 19).

Активное сопротивление демпферной клетки по продольной оси полюсов, приведенное к обмотке статора:

$$r_{kd} = \frac{35500 \cdot AW_A}{f \cdot 2\Phi_o}\left(\frac{C_b \cdot l_b}{B \cdot q_b} + \frac{0{,}2 \cdot D_i \cdot C_R}{p\, q_R}\right) \partial/ed. \qquad (17)$$

Здесь: C_b — отношение удельного сопротивления материала стержней демпферной клетки к удельному сопротивлению меди (§ 14);

B — число стержней на один полюс;

l_b — длина стержня до короткозамыкающих колец, в *см*;

q_b — сечение стержня в $мм^2$ (§ 14);

C_R — отношение удельного сопротивления материала короткозамыкающих сегментов или колец к удельному сопротивлению меди;

q_R — сечение короткозамыкающих сегментов или колец в $мм^2$.

Активное сопротивление демпферной клетки по поперечной оси полюсов, приведенное к обмотке статора:

а) для демпферной клетки с короткозамыкающими кольцами (§ 14):

$$r_{kq}=\frac{26600 \cdot AW_A}{f \cdot 2\Phi_o}\left(\frac{C_b l_b}{Bq_b}+\frac{0{,}4D_i C_R}{pq_R}\right) \ о/ед. \qquad (18)$$

в) для демпферной клетки с корткозамыкающими сегментами:

$$r_{kq}=\frac{81500 \cdot AW_A}{f \cdot 2\Phi_o}\left(\frac{C_b l_b}{Bq_b}+\frac{0{,}1 \cdot D_i C_R}{p \cdot q_R}\right) о/ед. \qquad (19)$$

Постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора:

$$T'_{do}=\frac{X_f}{r_f}=\frac{x_f+x_{ad}}{r_f} \ эл. \ рад. \qquad (20)$$

Постоянная времени демпферной клетки по продольной оси полюсов при разомкнутой обмотке статора и разомкнутой цепи возбуждения:

$$T'_{co}=\frac{x_{ad}+x_{kd}}{r_{kd}} \ эл. \ рад. \qquad (21)$$

Постоянная времени демпферной клетки по поперечной оси полюсов при разомкнутой обмотке статора:

$$T'_{qo}=\frac{x_{aq}+x_{kq}}{r_{kq}} \ эл. \ рад. \qquad (22)$$

Постоянная времени обмотки возбуждения при короткозамкнутой обмотке статора (при отсутствии демпферной клетки):

$$T'_d=\frac{x'_d}{x_d}T'_{do} \ эл. \ рад. \qquad (23)$$

Постоянная времени демпферной клетки по продольной оси полюсов при короткозамкнутой обмотке возбуждения и разомкнутой обмотке статора:

$$T''_{do} = \frac{x_{kd}x_f + x_{kd}x_{ad} + x_{ad}x_f}{r_{kd}(x_f + x_{ad})} \text{ эл. рад.} \quad (24)$$

Постоянная времени демпферной клетки по продольной оси полюсов при короткозамкнутой обмотке возбуждения и короткозамкнутой обмотке статора:

$$T''_d = \frac{x''_d}{x'_d} T''_{do} \text{ эл. рад.} \quad (25)$$

Постоянная времени демпферной клетки по поперечной оси полюсов при короткозамкнутой обмотке статора:

$$T''_q = \frac{x''_q}{x'_q} T'_{qo} \text{ эл. рад.} \quad (26)$$

Постоянная времени обмотки статора при короткозамкнутых обмотках ротора:

$$T_a = \frac{x_a}{r_a} \text{ эл. рад,} \quad (27)$$

где r_a — по § 11, сопротивление фазы обмотки статора в *о/ед.*

Примечание: Насыщенные значения реактивностей x'_{dN}, x''_{dN} и x''_{qN} получаются умножением значений x'_d, x''_d и x''_q на коэффициент ~0,88.

Приложение 2

ПОЯСНЕНИЯ К НЕКОТОРЫМ ПРИБЛИЖЕННЫМ ФОРМУЛАМ, ПРИМЕНЯЕМЫМ АВТОРОМ ПРИ ЭСКИЗНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИНХРОННЫХ МАШИН

1. § 2, форм. (9)

Первый член второй формулы пропорционален объёму кольца, заключающего в себе полюсы ротора.

Второй член этой формулы пропрационален объёму обода ротора. Коэффициенты 19 и 27 являются произведениями из числа 3, 14, удельного веса материала, коэффициента заполнения объёма металлом, коэффициента 1, 15, учитывающего относительный вес спиц и втулки ротора, и уточнены по данным ряда выполненных конструкций. Из рассмотренной второй формулы непосредственно вытекает формула для махового момента.

2. § 9, форм. (44), (45), (46) и (47)

В координатной плоскости с осями (D_k, D_a) были нанесены в виде точек соответствующие друг другу значения D_a и D_k для ряда выполненных машин. Эти точки расположились в довольно узкой полосе, средняя линия которой выражается уравнением (44).

Аналогично были получены формулы (45), (46) и (47).

3. § 12, форм. (55)

Эта формула вытекает из общеизвестных формул (64), (63), (59) и (58) параграфа 13, причем пределы изменения коэффициента k_0 взяты из ряда построенных машин.

4. § 14, форм. (72)

Эта приближенная формула выражает прямую зависимость потока рассеяния от ампервитков возбуждения (а следовательно, и от величины зазора δ), и обратную зависимость относительной величины потока рассеяния от полезного потока, пропорционального полюсному делению τ. Коэффициент 10 есть средняя величина, взятая из ряда выполненных подробных расчетов.

5. § 14. форм. (72а) и (73)

Получены аналогично п. 2.

6. § 19, форм. (101а)

Получена аналогично п. 2.

7. § 19, форм. (103) и (105)

В [Л. 9] для определения повышения температуры ϑ_{cu2} однослойных обмоток роторов синхронных машин рекомендована следующая формула с двумя поправочными кривыми:

$$\vartheta_{cu2} = \frac{b \cdot j_e^2}{k_1 \cdot k_2 \cdot C_0} \ (°\text{Ц}). \qquad (A)$$

Здесь: j_e — плотность тока в обмотке возбуждения;
b — ширина ленточной меди, намотанной на ребро (иначе — толщина катушки);
C_0 — опытный коэффициент теплоотдачи;

k_1 поправочный коэффициент, учитывающий влияние окружной скорости ротора v; он дан в виде кривой $k_1=\varphi(v)$;

k_2 поправочный коэффициент, учитывающий клияние отношения $\xi=\frac{l_1}{\tau}$ на охлаждение обмотки; он дан в виде кривой $k_2=\varphi(\xi)$.

Кривая $k_1=\varphi(v)$ имеет параболический характер и на участке обычных скоростей может быть приближенно выражена уравнением вида:

$$k_1=\alpha+\beta\sqrt{v}, \qquad (Б)$$

где α и β — числовые коэффициенты.

Кривая $k_2=\varphi(\xi)$ имеет гиперболический характер и на участке обычных значений ξ может быть приближенно, выражена уравнением вида:

$$k_2=\frac{\gamma}{\delta+\xi}, \qquad (В)$$

где — γ и δ — некоторые коэффициенты.

Определив коэффициенты α, β, γ и δ и подставив в (А) вместо k_1 и k_2 выражения (Б) и (В), приходим к приближенной формуле (105в).

Для многослойных обмоток из изолированных проводников прямоугольного профиля подобным же образом получаем по данным [Л. 9] формулу (103), в которой второй член, стоящий в квадратных скобках, учитывает ухудшение теплопередачи (течения тепла) внутри многослойной катушки вследствие наличия изоляции витков.

8. § 19, форм. (104)

Получена способом аналогичным описанному в п. 2.

Приложение 3

ВЫБОР, ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И РАСЧЕТ СКОРОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ И «ПОТОЛКА» ВОЗБУДИТЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ МАШИН

§ 1. Выбор потолка и скорости возбуждения возбудителя

При внезапных перегрузках синхронного генератора, в особенности же при коротких замыканиях в питаемой им сети, напряжение генератора мгновенно (резким скачком) умень-

шается сначала на сравнительно небольшую величину (первичное падение напряжения) и в его обмотке возбуждения возникает экстраток положительного направления, который стремится поддержать неизменным магнитный поток и внутреннюю эдс генератора. Если этот экстраток предоставить самому себе, то он довольно быстро затухает, реакция перегруженного якоря остается нескомпенсированной, а потому напряжение генератора начинает катастофически падать (вторичное падение напряжения).

Как известно, в таких случаях для поддержания напряжения генератора применяют «форсировку возбуждения», т. е. быстрый подъём напряжения возбудителя от номинального значения до его «потолка». Потолочное напряжение возбудителя, превышающее номинальное в 1,5 ÷ 2 раза, поддерживает экстраток в обмотке ротора генератора, препятствуя его затуханию, и, таким образом, способствует компенсации реакции якоря и препятствует возникновению упомянутого выше вторичного падения напряжения генератора. После отключения аварийного участка сети, напряжение возбудителя, а с ним и ток возбуждения генератора, возвращаются к нормальным значениям.

Ввиду значительного разнообразия в характере, интенсивности и скорости нарастания различных аварийных перегрузочных режимов генератора затруднительно указать такую скорость возбуждения возбудителя и такой его потолок, которые были бы достаточны для обезвреживания наиболее тяжелого аварийного режима. В связи с этим пока не существует общепризнанных узаконенных величин скорости возбуждения и потолка возбудителей, а также и методики их определения, и эти величины задаются при разработке проекта установки в зависимости от её особенностей и от личных взглядов и убеждений проектировщика.

До последнего времени довольствовались 1,5 ÷ 2 кратным потолком при скорости возбуждения 1 ÷ 1,5 номинала в секунду. В настоящее же время выявилась тенденция увеличивать потолки возбудителей до 3 и даже до 5-ти кратного значения при скоростях возбуждения 2 ÷ 3 номинала в секунду.

Однако следует иметь в виду, что высокие потолки приводят к почти пропорциональному увеличению типовой (габаритной) мощности возбудителя, а большие скорости возбуждения — к значительному уменьшению его кпд.

§ 2. Опытное определение скорости возбуждения и потолка возбудителей

а) Постановка задачи

В ГОСТ 183-41, § 33, дано такое определение скорости нарастания напряжения машин постоянного тока:

„Номинальная скорость нарастания возбуждения машины характеризуется наклоном спрямленной части кривой, которая представляет изменение напряжения возбуждения машины на контактных кольцах (в случае синхронной машины) или на зажимах обмотки возбуждения (в случае машины постоянного тока) от номинального значения этого напряжения до значения, получающегося через 0,5 секунды после шунтирования регулирующего сопротивления".

В ГОСТ не имеется никаких указаний относительно метода, условий и обстоятельств получения опытной кривой возбуждения возбудителя, по которой следует находить его скорость возбуждения и его «потолок», а также нет указаний относительно условий, для которых должна быть рассчитана теоретическая кривая возбуждения. Ввиду этого до последнего времени при испытаниях возбудителей довольствовались проверкой потолка и скорости нарастания напряжения возбудителя при его холостом ходе. Между тем, для оценки эксплоатационных качеств системы возбуждения решающее значение имеют потолок и скорость возбуждения возбудителя при номинальной его нагрузке, а они значительно (иногда в два раза) меньше потолка и скорости возбуждения при холостом ходе, в особенности в малых возбудителях с самовозбуждением. В связи с этим назрела потребность в уточнении и узаконении метода опытной проверки скорости возбуждения и потолка возбудителей, и в уточнении методики их расчета.

в) Способы опытного определения скорости возбуждения и «потолка» возбудителей

При испытаниях возбудителей возможны следующие основные методы опытной проверки потолка и скорости возбуждения, расположенные в порядке возрастающей трудности их осуществления.

1. Проверка потолка и скорости возбуждения (по ГОСТ 183-41) при холостом ходе возбудителя; опыт форсировки возбуждения (т. е. опыт подъёма напряжения до его потолочного значения) начинают при номинальном напряжении возбудителя.

2. Проверка потолка и скорости возбуждения (по ГОСТ 183-41) при работе возбудителя на нагрузочный реостат, заменяющий собою обмотку возбуждения синхронной машины (или машины постоянного тока) и имеющий равное с нею омическое сопротивление; опыт форсировки возбуждения начинают при номинальном напряжении и при номинальном токе возбудителя.

3. Проверка потолка и скорости возбуждения при работе возбудителя на обмотку индуктора возбуждаемой им синхронной машины или машины постоянного тока, вращающейся или неподвижной; опыт форсировки возбуждения начинают при номинальном напряжении и при номинальном токе возбудителя.

4. Проверка потолка и скорости возбуждения при работе возбудителя в нормальной рабочей схеме, при номинальной его нагрузке; опыт форсировки возбуждения производят при номинальной нагрузке синхронной машины путем осуществления «близкого» или «отдаленного» (через добавочное сопротивление) короткого замыкания синхронной машины. Этот опыт одновременно является проверкой работы всей системы возбуждения и её аппаратуры в аварийном режиме.

Примечание: В пунктах 1, 2, 3 и 4 под номинальным напряжением и номинальным током возбудителя разумеются напряжение и ток возбудителя, соответствующие номинальной нагрузке синхронной машины (или машины постоянного тока).

Рассмотрим подробнее перечисленные выше методы испытания.

Испытание 1 в настоящее время нельзя признать достаточным по указанным выше причинам — оно может иметь лишь вспомогательное значение.

Испытание 4 может быть выполнено только в отдельных, исключительных случаях, а потому должно быть признано практически неосуществимым в обстановке заводских испытаний.

Таким образом, в нашем распоряжении остаются только испытания 2 и 3.

Для возбудителей синхронных машин испытания 2 и 3 могут дать лишь приближенную картину процесса форсировки возбуждения, так как в этих испытаниях отсутствует и остается неучтённым влияние на процесс возбуждения медленно затухающего экстратока положительного (согласного) направления, возникающего в обмотке возбуждения синхронной машины (а следовательно, и в якоре возбудителя) при внезапных перегрузках и коротких замыканиях синхронной машины. Однако испытание 2 ближе подходит к действительности, чем

испытание 3, так как в нём отсутствие экстратока частично компенсируется быстрым нарастанием тока якоря, нагруженного на практически безиндукционный реостат.

Для возбудителей машин постоянного тока испытание 3 является полноценным, так как при изменениях нагрузки компенсированных машин постоянного тока экстратоки в цепи их возбуждения незначительны. В некомпенсированных машинах эти эксратоки более значительны, но всё же не оказывают существенного влияния на работу возбудителей. Поэтому испытания возбудителей машин постоянного тока по методу 2 дают пессимистические результаты, так как при нагрузке возбудителя на безиндукционный реостат ток в якоре возбудителя нарастает вместе (одновременно) с ростом напряжения и уменьшает потолок и скорость возбуждения, тогда как в реальных условиях ток якоря возбудителя в течение стандартного промежутка времени 0,5 секунды (см. ГОСТ 183-41, § 33) нарастает на значительно меньшую (а часто и на ничтожную) величину, чем при нагрузке на реостат, вследствие большой самоиндукции обмотки возбуждения машины постоянного тока.

Из предыдущего вытекает, что испытания возбудителей синхронных машин следует производить по методу 2, а испытания возбудителей машин постоянного тока — по возможности, по методу 3. Расчёты же потолка и скорости возбуждения необходимо выполнять пессимистически (с запасом) для условий испытания по методу 2.

§ 3. Расчёт процесса независимого возбуждения при холостом ходе возбудителя

Пренебрегая влиянием вихревых токов в станине, напишем дифференциальное уравнение равновесия эдс цепи возбуждения; оно имеет вид:

$$e = ir + 2pw\frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8}. \quad (1)$$

Здесь: e — напряжение источника независимого возбуждения;

i мгновенное (текущее) значение тока возбуждения;

r — сопротивление цепи возбуждения (обмотки и добавочного сопротивления, если таковое имеется);

$2p$ — число полюсов;

w — число витков обмотки возбуждения на один полюс;

σ — коэффициент рассеяния полюса [Л. 1];
Φ — мгновенное (текущее) значение полезного потока одного полюса;
t — время в секундах.

В заводской практике удобно решать дифференциальные уравнения процессов возбуждения методом последовательных интервалов следующим образом.

Напишем (1) в форме конечных приращений:

$$e = i_m r + 2pw\sigma \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \cdot 10^{-8}. \tag{2}$$

Здесь: Δt — некоторый малый промежуток времени;
$\Delta\Phi$ — приращение магнитного потока в течение промежутка времени Δt;
i_m — средняя величина тока возбуждения в промежутке времени Δt, причём:

$$i_m = \frac{i_1 + i_2}{2}, \tag{3}$$

где: i_1 и i_2 — значения тока i в начале и в конце промежутка времени Δt.

Если обозначить через E_N и Φ_N какие-либо соответствующие друг другу значения эдс и полезного магнитного потока одного полюса (например, их номинальные значения), а через ΔE — приращение эдс, соответствующее приращению потока $\Delta\Phi$, то при постоянной скорости вращения машины будем иметь следующие соотношения:

$$\frac{\Delta E}{\Delta\Phi} = \frac{E_N}{\Phi_N}, \tag{4}$$

откуда получаем:

$$\Delta\Phi = \Delta E \cdot \frac{\Phi_N}{E_N}. \tag{5}$$

Подставив (3) и (5) в (2), находим:

$$\Delta t = \frac{2pw\sigma\Phi_N \cdot \Delta E}{E_N \cdot 10^8 \left[e - \frac{(i_1+i_2)r}{2}\right]}. \tag{6}$$

Так как:

$$\Delta E = E_2 - E_1, \tag{7}$$

где: E_2 и E_1 — эдс, соответствующие по характеристике холостого хода токам возбуждения i_2 и i_1.

Подставив (7) в (6), получаем расчётную формулу:

$$\Delta t = \frac{4pw\sigma\Phi_N(E_2 - E_1)}{E_N \cdot 10^8[2e - (i_1 + i_2)r]}. \quad (8)$$

§ 4. Расчёт процесса самовозбуждения при холостом ходе возбудителя

Если пренебречь падением напряжения в обмотке якоря, создаваемым током возбуждения, т. е. положить: $U \approx E$, то для расчёта процесса самовозбуждения можно воспользоваться формулой (8), подставив в неё вместо постоянного напряжения e среднее значение изменяющегося напряжения машины, т. е. положив:

$$e = \frac{E_1 + E_2}{2}. \quad (9)$$

При этом получим расчётную формулу:

$$\Delta t = \frac{4pw\sigma\Phi_N(E_2 - E_1)}{E_N \cdot 10^8[E_1 + E_2 - (i_1 + i_2)r]}. \quad (10)$$

Формула (10) применима при условии, что падение напряжения в обмотке якоря, создаваемое током возбуждения, не превышает $2 \div 3\%$ от эдс машины, иными словами — в случаях, когда без заметной погрешности можно приравнять напряжение машины её эдс. Если это условие не выполняется, то расчёт процесса самовозбуждения при холостом ходе нужно производить, как описано в § 5.

§ 5. Расчёт процесса независимого возбуждения нагруженного возбудителя

В процессе независимого возбуждения при холостом ходе ток возбуждения нарастает от нуля до конечного установившегося значения Oz (рис. 16); при этом эдс возбудителя нарастает по характеристике холостого хода Oma от остаточного значения до конечного установившегося («потолочного») значения za.

Если в процессе независимого возбуждения по обмотке якоря возбудителя протекает ток, создающий реакцию якоря и омическое падение напряжения, то эдс возбудителя нарастает по внутренней нагрузочной характеристике Onc (рис. 16), все

точки которой расположены вправо от характеристики холостого хода *Oma* на величину, равную текущим размагничивающим ампервиткам реакции якоря (например, на отрезок *mn* в точке *n*); напряжение же возбудителя нарастает по внешней нагрузочной характеристике *Oqpb*, все точки которой расположены вниз от внутренней нагрузочной характеристики *Onc* на отрезок, равный текущему падению напряжения в обмотке якоря (например, на отрезок *nq* в точке *q*).

С практической точки зрения нас интересует не весь процесс возбуждения от остаточного напряжения до конечного (потолочного) напряжения, а только процесс **форсировки возбуждения**, т. е. подъём напряжения возбудителя от номинального значения *fq* до потолочного значения *zb* (рис. 16), что соответствует увеличению тока возбуждения от номинального значения *Of* до потолочного значения *Oz*.

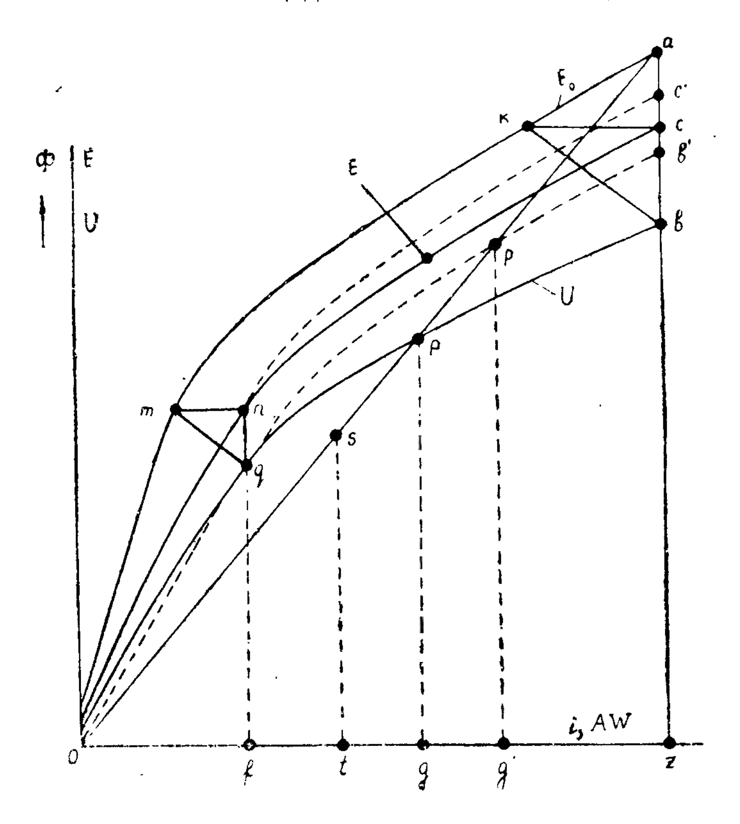


Рис. 16. Характеристика холостого хода (*Oma*), внутренняя нагрузочная (*Onc* и *Onc'*) и внешняя нагрузочная (*Oqb* и *Oqb'*) характеристики возбудителя

Рассматривая процесс форсировки независимого возбуждения, мы должны различать два случая.

Первый случай. Якорь возбудителя включен на безиндукционное сопротивление R нагрузочного реостата (см. испытания по методу 2, § 1). В этом случае в установившемся режиме, при номинальном токе возбуждения Of (рис. 16), номинальное напряжение машины равно fq, а её эдс равна fn, причём отрезок nq есть омическое падение напряжения, а отрезок mn — размагничивающие ампервитки реакции якоря. Если зашунтировать добавочное сопротивление в обмотке независимого возбуждения, т. е. начать процесс форсировки возбуждения, то напряжение возбудителя будет нарастать по внешней нагрузочной характеристике qpb, а вместе с ним (пропорционально напряжению) будет нарастать и ток I в цепи якоря в соответствии с уравнением:

$$I = \frac{U}{R},$$

где R — омическое сопротивление безиндукционного реостата.

Вместе с током якоря будут нарастать реакция якоря и омическое падение напряжения, вследствие чего при потолочном напряжении возбудителя zb треугольник реакции якоря увеличится до размеров $bckb$ (необходимо иметь в виду, что в области значительных насыщений, т. е. на верхнем прямолинейном участке характеристики холостого хода, реакция якоря уменьшается до нуля, горизонтальный катет треугольника реакции якоря исчезает и внутренняя характеристика сливается с характеристикой холостого хода).

Второй случай. Якорь возбудителя включен на обмотку ротора синхронной машины (или на обмотку возбуждения машины постоянного тока), имеющую то же омическое сопротивление R, как и в первом случае, но обладающую большой самоиндукцией (см. испытание по методу 3, § 1).

В этом случае, в установившемся режиме при токе независимого возбуждения Of, возбудитель будет развивать то же номинальное напряжение fq и ту же эдс fn, как и в первом случае. Если закоротить добавочное сопротивление в обмотке независимого возбуждения, т. е. начать процесс форсировки возбуждения, то напряжение возбудителя будет быстро нарастать, ток же в цепи якоря будет нарастать медленно, вследствие большой самоиндукции нагрузки. Можно считать, что в быстродействующих возбудителях в течение процесса форсировки возбуждения ток якоря, а с ним реакция якоря и паде-

ние напряжения, практически останутся неизменными; поэтому эдс возбудителя будет нарастать по пунктирной внутренней нагрузочной характеристике Onc' (рис 16), все точки которой расположены вправо от х. х. хода Oma на постоянный отрезок mn; напряжение же возбудителя будет нарастать по пунктирной внешней нагрузочной характеристике $Oqp'b'$, все точки которой расположены ниже пунктирной внутренней нагрузочной характеристики Onc' на постоянный отрезок nq[1]. Таким образом, быстродействующий возбудитель за короткий промежуток времени придёт к временному потолку zb'. По мере того, как ток якоря, а с ним и падение напряжения и реакция якоря, будут медленно нарастать, временный потолок возбудителя будет уменьшаться, и через некоторое время, зависящее от величины самоиндукции нагрузки (обмотки возбуждения синхронной машины или машины постоянного тока), возбудитель достигнет конечного, установившегося потолка zb.

Для расчёта процесса независимого возбуждения нагруженного возбудителя можно исходить из формулы (8), но учесть при этом, что эдс и напряжение возбудителя теперь связаны с током возбуждения не характеристикой холостого хода, а внутренней нагрузочной и внешней нагрузочной характеристиками (рис. 16). Вследствие этого в рассмотренном выше п е р в о м с л у ч а е внутренняя нагрузочная характеристика Onc в любой её точке связана с внешней нагрузочной характеристикой $Oqpb$ следующим соотношением:

$$E=U+Ir_{а}=U+\frac{U}{R}\,r_{а}=U\left(1+\frac{r_{а}}{R}\right), \qquad (11)$$

где: $r_{а}$ — сопротивление якоря возбудителя на зажимах (включая сопротивление всех обмоток главного тока):

R — сопротивление нагрузочного реостата.

Разность E_2-E_1, входящую в (8), можно с помощью (11) выразить следующим образом:

$$E_2-E_1=\left(1+\frac{r_{а}}{R}\right)(U_2-U_1)\ . \qquad (12)$$

Подставив (12) в (8), получаем формулу для расчета процесса форсировки возбуждения в п е р в о м с л у ч а е, т. е. для условий испытания по методу 2, § 1:

---

[1] Необходимо иметь в виду, что в области значительных насыщений, т. е. на верхнем прямолинейном участке х. х. хода, реакция якоря уменьшается до нуля, и внутренняя нагрузочная характеристика сливается с х. х. хода.

$$\Delta t = \frac{4pw_э\Phi_N\left(1+\frac{r_a}{R}\right)(U_2-U_1)}{E_N \cdot 10^8[2e-(i_1+i_2)r]} \cdot \quad (13)$$

Здесь: U_1 и U_2 — напряжения возбудителя, соответствующие токам возбуждения i_1 и i_2 по внешней нагрузочной характеристике $Oqpb$ (рис. 16).

Во втором случае, т. е. при неизменном токе якоря, имеем:

$$E = U + I_N \cdot r_a. \quad (14)$$

Здесь: E и U — эдс и напряжение возбудителя, соответствующие пунктирным характеристикам рис. 16.

На основании (14) получаем:

$$E_2 - E_1 = U_2 + I_N r_a - (U_1 + I_N r_a) = U_2 - U_1. \quad (15)$$

Подставив (15) в (8), получаем формулу для расчёта процесса форсировки возбуждения и определения временного потолка возбудителя во втором случае, т. е. для условий испытания по методу 3, § 1:

$$\Delta t = \frac{4pw_э\Phi_N(U_2-U_1)}{E_N \cdot 10^8[2e-(i_1+i_2)r]} \cdot \quad (16)$$

Здесь: U_1 и U_2 — напряжения возбудителя, соответствующие токам возбуждения i_1 и i_2 по пунктирной внешней нагрузочной характеристике Oqp^1b^1 (рит. 16).

§ 6. Расчёт процесса самовозбуждения нагруженного возбудителя

В процессе самовозбуждения при холостом ходе ток возбуждения нарастает от нуля до конечного установившегося значения Oz (рис. 16); при этом эдс возбудителя нарастает (если положить, что $E \approx U$) по характеристике холостого хода Oma от остаточного значения до конечного установившегося значения (потолка) za. При этом величина эдс za и тока Oz определяется точкой a пересечения характеристики холостого хода с характеристикой шунтовой обмотки, т. е. с прямой линией $Ospp^1a$.

Характеристика шунтовой обмотки есть зависимость между установившимся током возбуждения и напряжением на зажи-

мах шунтовой цепи, представляющая собою прямую линию *Ospa*, проходящую через начало координат (рис. 16). Её можно построить по уравнению:

$$U=i\,.\,r, \qquad (17)$$

где r — сопротивление шунтовой цепи, включая регулирующее и ограничительное сопротивления, если таковые имеются.

Задавшись каким-либо произвольно выбранным значением тока возбуждения, например, приняв $i=Ot$, находим по (17) соответствующее напряжение на цепи возбуждения:

$$U=i\,.\,r=Ot\,.\,r. \qquad (18)$$

Отложив это напряжение в виде отрезка *ts*, проводим прямую $Ospp^1a$ до пересечения её с характеристикой холостого хода в точке *a*.

Рассматривая процесс самовозбуждения нагруженного возбудителя, необходимо различать два случая.

Первый случай. Якорь возбудителя включен на безиндукционное сопротивление *R* нагрузочного реостата. В этом случае в установившемся режиме, при номинальном токе возбуждения *Of* (рис. 16), номинальное напряжение возбудителя равно *fq*, а его эдс равна *fn*, причем отрезок *nq* есть омическое падение напряжения в якоре, отрезок *mn* — размагничивающие ампервитки реакции якоря, а прямая *Oq* — характеристика шунтовой цепи. Если закоротить добавочное сопротивление в цепи возбуждения, т. е. перевести возбудитель с характеристики шунта *Oq* на новую характеристику шунта *Ospa*, то начнётся процесс форсировки возбуждения, и напряжение возбудителя будет нарастать; вместе с напряжением (и пропорционально ему) будет нарастать ток в цепи якоря (так как нагрузочный реостат безиндукционен), а также омическое падение напряжения в якоре и реакция якоря. Таким образом, напряжение возбудителя будет увеличиваться, следуя по внешней нагрузочной характеристике *Oqp*, до тех пор, пока не достигнет значения *gp*, определяемого точкой пересечения *p* внешней характеристики *Oqp* с характеристикой шунта *Osp*.

Второй случай. Якорь возбудителя включен на обмотку возбуждения синхронной машины (или машины постоянного тока), имеющую то же омическое сопротивление *R*, как и в первом случае, но обладающую большой самоиндукцией. В этом случае, в установившемся режиме при номинальном токе возбуждения *Of* (рис. 16) возбудитель будет развивать то же номинальное напряжение *fq*,

как и в пéрвом случае. Если закоротить добавочное сопротивление в цепи самовозбуждения, то напряжение возбудителя будет быстро нарастать, ток же в цепи якоря будет нарастать медленно вследствие большой самоиндукции нагрузки (обмотки возбуждения синхронной машины или машины постоянного тока). Можно считать, что в быстродействующем возбудителе, в течение процесса форсировки возбуждения, ток в цепи якоря (а с ним падение напряжения и реакция якоря) практически не изменятся, а потому эдс возбудителя будет нарастать по пунктирной внутренней нагрузочной характеристике Onc^1 (рис. 16), все точки которой сдвинуты вправо от характеристики холостого хода Oma на постоянный (или уменьшающийся) отрезок mn; напряжение же возбудителя будет нарастать по пунктирной внешней нагрузочной характеристике Oqb^1, все точки которой расположены ниже пунктирной внутренней характеристики Onc^1 на постоянный отрезок nq. Таким образом, быстродействующий возбудитель за короткий промежуток времени достигнет временного потолка g^1p^1 (рис. 16), определяемого точкой пересечения p^1 пунктирной внешней характеристики Osp^1 с характеристикой шунта $Ospp^1$. По мере того, как ток якоря будет медленно нарастать, напряжение возбудителя, т. е. его временный потолок, будет уменьшаться до тех пор, пока через некоторый промежуток времени, зависящий от величины самоиндукции нагрузки (обмотки возбуждения синхронной машины или машины постоянного тока), не достигнет конечного установившегося потолка gp.

Для расчёта процесса форсировки возбуждения самовозбуждающегося нагруженного возбудителя и определения его потолка в первом случае, т. е. для условий испытания по методу 2, § 1, можно применить формулу (13), заменив в ней постоянное напряжение e текущим средним значением напряжения возбудителя, т. е. подставив:

$$e = \frac{U_1 + U_2}{2} . \tag{19}$$

При этом формула (13) получает вид:

$$\Delta t = \frac{4pw\sigma\Phi_N \left(1 + \frac{r_a}{R}\right)(U_2 - U_1)}{E_N \cdot 10^8 [U_1 + U_2 - (i_1 + i_2) r]} . \tag{20}$$

Здесь: U_1 и U_2 — напряжения возбудителя, взятые по сплошной внешней нагрузочной характеристике $Oqpb$ (рис. 16), соответственно токам возбуждения i_1 и i_2.

Для расчёта процесса форсировки возбуждения самовозбуждающегося нагруженного возбудителя и определения его временного потолка во втором случае, т. е. для условий испытания по методу 3, § 1, можно воспользоваться формулой (16), подставив в неё:

$$e=\frac{U_1+U_2}{2}. \qquad (21)$$

При этом она получит вид:

$$\Delta t=\frac{4pw\sigma\Phi_N(U_2-U_1)}{E_N\cdot 10^8[U_1+U_2-(i_2+i_1)r]}. \qquad (22)$$

Здесь: U_1 и U_2 — напряжения возбудителя, взятые по пунктирной внешней нагрузочной характеристике Oqp^1b^1 (рис. 16) соответственно токам возбуждения i_1 и i_2.

Пример расчёта процесса самовозбуждения нагруженного возбудителя и определения его временного и конечного потолка дан ниже.

§ 7. Расчёт процесса возбуждения в возбудителях с компаундной обмоткой

Расчёт процессов возбуждения при наличии компаундной обмотки значительно осложняется; а потому здесь мы ограничимся лишь кратким рассмотрением характера и практических результатов влияния компаундной обмотки на процессы возбуждения.

При форсировке возбуждения машины с независимым возбуждением, или с самовозбуждением, работающей на безиндукционный нагрузочный реостат, ампервитки компаундной обмотки, быстро нарастающие пропорционально напряжению, вызывают в обмотке возбуждения экстраток обратного направления, стремящийся уравновесить ампервитки компаундной обмотки; поэтому скорость нарастания результирующего потока и напряжения машины в стандартном промежутке времени 0,5 секунды увеличивается незначительно. Возбудитель быстро достигает временного потолка, который, вследствие довольно медленного затухания экстратока в обмотке возбуждения, медленно переходит в конечный потолок. Таким образом, компанудная обмотка, которая в возбудителях обычно доставляет не более 8 ÷ 10% номинальных ампервитков возбуждения, практически почти не изменяет скорости возбуждения, но изменяет величину конечного потолка.

Конечный потолок при наличии компаундной обмотки можно найти следующим образом. В установившемся состоянии при каком-либо напряжении U ампервитки компаундной обмотки на один полюс равны:

$$AW_k = \frac{w_k}{a_k} \cdot \frac{U}{R} \cdot \qquad (23)$$

Здесь: w_k — число витков компаундной обмотки на полюс;

a_k — число параллельных ветвей компаундной обмотки;

R — сопротивление нагрузочного реостата или обмотки возбуждения синхронной машины (или машины постоянного тока).

Пусть на рис. 17 отрезок Oz — конечные (потолочные) ампервитки независимого возбуждения. Задавшись каким-либо напряжением U, откладываем его в виде отрезка zx. Затем вычисляем AW_k для выбранного напряжения U по (23) и откладываем их в виде отрезка xs. Проведя луч zsb, найдём конечный установившийся потолок в виде отрезка z^1b.

В случае возбудителя с самовозбуждением суммарные ампервитки возбуждения на один полюс в установившемся состоянии при каком-либо напряжении U равны:

$$AW_t = AW_m + AW_k = \frac{U \cdot w}{r} + \frac{U \cdot w_k}{R \cdot a_k} =$$

$$= U\left(\frac{w}{r} + \frac{w_k}{R \cdot a_k}\right) \cdot \qquad (24)$$

Задавшись каким-либо напряжением U, откладываем его на рис. 17 в виде отрезка Oy. Затем вычисляем суммарные ампервитки возбуждения по (24) и откладываем их в виде отрезка yc. Проводя луч Ocd, находим конечный потолок md.

При форсировке возбуждения компаундного возбудителя, работающего на индуктивную нагрузку, ампервитки компаундной обмотки в течение стандартного промежутка времени 0,5 секунды практически не изменяются. Возбудитель быстро приходит к временному потолку, который, по мере возрастания тока якоря, медленно переходит в конечный потолок; последний определяется, как описано выше. Таким образом, и в этом случае компаундная обмотка практически не влияет на скорость возбуждения, определяемую по ГОСТ 183-41.

Резюмируя, изложенное выше, приходим к выводу, что в обоих случаях нагрузки расчёт скорости возбуждения возбу-

дителя, определяемой по ГОСТ 183-41, можно вести без учёта влияния компаундной обмотки, как описано в п. 5 и 6; при этом получим в отношении скорости возбуждения несколько пессимистические (преуменьшенные) результаты, создающие некоторый запас в расчёте. Конечный потолок находим, как описано выше, но время его достижения, зависящее от параметров обмотки возбуждения возбудителя и индуктивности нагрузки, остаётся при этом неизвестным (что практически не имеет существенного значения).

Примеры расчёта скорости возбуждения и потолка возбудителя

Данные возбудителя. $U_N=50$ *в* $I_N=150$ *а*. Число пар полюсов $p=2$. Обмотка возбуждения: четыре катушки последовательно по 110 витков; сопротивление обмотки (горячее) $r=1,25$ *ома*. Сопротивление цепи якоря (горячее) $r_a=0,060$ *ома*. Сопротивление нагрузочного реостата (равное сопротивлению обмотки возбуждения синхронной машины) $R=0,333$ *ома*. Номинальной эдс возбудителя $E_N=58$ *в* соответствует номинальный магнитный поток одного полюса $\Phi_N=2,70 \cdot 10^6$.

Коэффициент рассеяния $\sigma=1,15$. Внешняя нагрузочная характеристика $U=\varphi(i)$, внутренняя нагрузочная характеристика $E=\varphi(i)$ при работе возбудителя на внешнее сопротивление $R=0,333$ *ома*, а также характеристика холостого хода возбудителя выражаются следующими кривыми:

i=0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80
U=3	18	31	45	53	59	63	73	80	87	93	100
E=4	22	39	53	62	68	74	83	93	101	109	118
E_0=5	29	50	62	70	76	81	90	97	104	111	118

а) Расчет процесса независимого возбуждения при холостом ходе

Обмотка возбуждения включается на постоянное напряжение $e=75$ *в*; при этом конечный установившийся ток возбуждения будет равен $i_к=\frac{e}{r}=\frac{75}{1,25}=60$ *а*, а соответствующая ему эдс по характеристике холостого хода $E_0=104$ *в*.

Подставив в (8) параметры возбудителя, получаем расчётную формулу:

$$\Delta t = \frac{4 \cdot 2 \cdot 110 \cdot 1{,}15 \cdot 2{,}70 \cdot 10^6 (E_2 - E_1)}{58 \cdot 10^8 [2 \cdot 75 - 1{,}25(i_1 + i_2)]} =$$

$$= 0{,}376 \cdot \frac{(E_2 - E_1)}{120 - (i_1 + i_2)} \cdot \qquad \text{(A)}$$

Для расчёта составим таблицу 1.

Таблица 1

i	E_0	Δt	t
0	5	—	0
5	28	0,0753	0,0753
10	50	0,0787	0,1540
15	62	0,0475	0,2015
20	71	и так далее	
25	76		
30	81		
35	85		
40	89		
45	93		
50	96		
55	100		
. . .	. . .	. . .	. . .
. . .	. . .	. . .	. . .
60	104	∞	∞

В первую строку её впишем начальные условия процесса, а в первый столбец — значения независимой переменной, т. е. тока возбуждения, взятые равными ступенями, примерно по 4÷5% от конечной величины i_k (в нашей примерной таблице

для сокращения её размеров взяты значительно большие ступени). Во второй столбец впишем эдс, соответствующие выбранным токам возбуждения по характеристике холостого хода, начиная от остаточной эдс и кончая эдс, равной (0,95÷0,97) конечной установившейся её величины. Таким образом, расчёт доводим только до 95÷97% конечного значения эдс, так как теоретически установившееся её значение достигается лишь в течение бесконечно большого времени.

Для второй строки находим по (A):

$$\Delta t = \frac{0{,}376(28-5)}{120-(0+5)} = 0{,}0753 \text{ сек.}; \; t = \Delta t = 0{,}0753 \text{ сек.}$$

Для третьей строки получаем:

$$\Delta t = \frac{0{,}376(50-28)}{120-(5+10)} = 0{,}0787; \; t = 0{,}0753+0{,}0787 = 0{,}154 \text{ сек.}$$

Для четвертой строки находим:

$$\Delta t = \frac{0{,}376(62-50)}{120-(10+15)} = 0{,}0475 \text{ сек.}; \; t = 0{,}154 + 0{,}0475 = 0{,}2015 \text{ сек.}$$

и так далее.

Закончив вычисления, строим по таблице 1 кривые $i=\varphi(t)$ и $E_0=\varphi(t)$. Далее, спрямляя последнюю кривую от точки $E_0=50$ *в* на отрезке времени $t=0{,}5$ *сек.*, как рекомендует ГОСТ — 183-41, находим скорость возбуждения в вольтах в секунду (или в номиналах в секунду).

в) Расчёт процесса самовозбуждения при холостом ходе

В цепь обмотки возбуждения включено добавочное сопротивление 0,60 *ома* для ограничения тока возбуждения; таким образом сопротивление цепи возбуждения $r=1{,}25+0{,}60=1{,}85$ *ом*. Построив на клетчатой бумаге характеристику холостого хода и характеристику шунтовой цепи с помощью (17) и (18), находим, что возбудитель возбудится до $E=99$ *в* при токе самовозбуждения $i_k=54$ *а*.

Подставив параметры возбудителя в (10), получаем расчётную формулу:

$$\Delta t = \frac{4 \cdot 2 \cdot 110 \cdot 1{,}15 \cdot 2{,}70 \cdot 10^6 (E_2 - E_1)}{58 \cdot 10^8 [E_1 + E_2 - 1{,}85(i_1+i_2)]} = 0{,}470 \frac{E_2 - E_1}{E_1 + E_2 - 1{,}85(i_1+i_2)} \qquad \text{(B)}$$

Для расчёта составляем таблицу 2, подобную таблице 1, вписав в неё токи возбуждения в пределах от 0 до 50 *ампер*, и соответствующие им эдс по характеристике холостого хода, в пределах от 5 *в* до 96 *вольт* (что составляет 97% от конечной эдс 99 *вольт*).

Таблица 2

i	E_0	Δt	t
0	5	—	0
5	28	0,455	0,455
10	50	0,206	0,661
15	62	0,0866	0,748
20	71		
25	76		
30	81		
35	85		
40	89		
45	93		
50	96		
. . .	. . .	. . .	. . .
. . .	. . .	. . .	. . .
54	99	∞	∞

В таблице 2 для сокращения её размеров приняты ступени тока в 10% вместо рекомендуемых (4÷5)%.

Для второй строки по формуле (B) находим:

$$\Delta t = \frac{0,470(28-5)}{5+28-1,85(0+5)} = 0,455 \text{ сек. } t = \Delta t = 0,455.$$

Для третьей строки получаем:

$$\Delta t = \frac{0,470(50-28)}{28+50-1,85(5+10)} = 0,206 \text{ сек.; } t = 0,455 + 0,206 = 0,661 \text{ сек,}$$

Для четвертой строки находим:

$$\Delta t = \frac{0,470(62-50)}{50+62-1,85(10+15)} = 0,0866 \text{ сек. } t = 0,661 +$$

$$+0,0866 = 0,748 \text{ сек.}$$

и так далее.

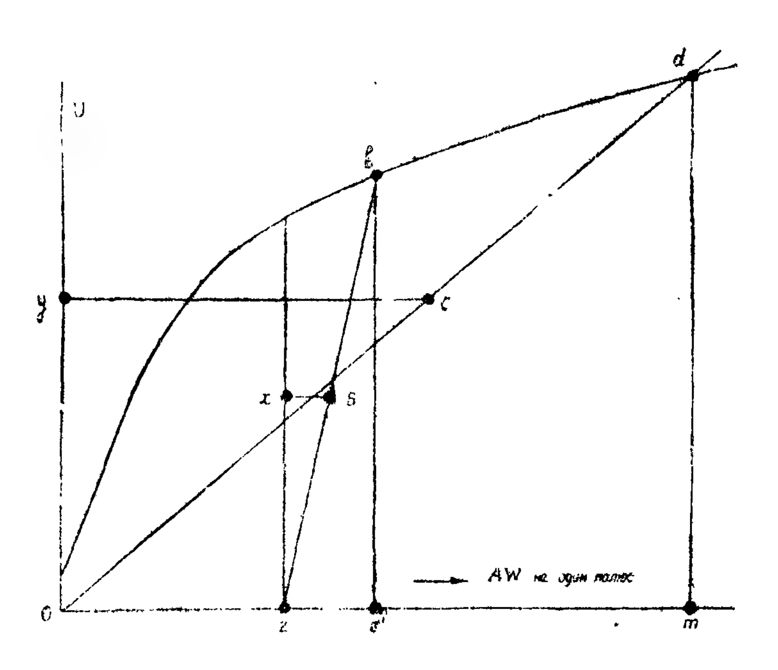


Рис. 17. Определение конечного потолка по внешней нагрузочной характеристике возбудителя, построенной для $R = const$

Закончив таблицу, строим по ней кривые $i = \varphi(t)$ и $E_0 = \varphi(t)$; далее, спрямляя кривую $E_0 = \varphi(t)$, от точки $E_0 = 50$ *в*, на отрезке времени $t = 0,5$ *сек.*, находим по ГОСТ 183-41 скорость самовозбуждения при холостом ходе сначала в вольтах в секунду, а затем и в номиналах в секунду.

с) Расчёт процесса форсировки возбуждения самовозбуждающегося возбудителя, работающего на нагрузочный (безиндукционный) реостат

Построив по приведенной ранее таблице внешнюю нагрузочную характеристику возбудителя $U = \varphi(i)$, работаю-

щего на нагрузочный реостат с $R=0{,}333$ *ома*, находим, что для поддержания номинального напряжения 50 *вольт* ток возбуждения должен быть равен 17,5 *ампер*; следовательно, сопротивление цепи возбуждения должно быть:

$$r=\frac{50}{17{,}5}=2{,}85 \text{ ома},$$

а добавочное сопротивление в цепи возбуждения равно:

$$r_{\text{доб}}=2{,}85-1{,}25=1{,}60 \text{ ома}.$$

Для форсировки возбуждения это добавочное сопротивление закорачивается и напряжение возбудителя повышается. Совместив на графике внешнюю нагрузочную характеристику и новую характеристику шунта (соответствующую сопротивлению 1,25 *ома*), находим, что напряжение возбудителя поднимется до 100 *в* при токе самовозбуждения 80 *ампер*.

Пдставляя в (20) параметры возбудителя, получаем расчётную формулу:

$$\Delta t=\frac{4\,.\,2\,.\,110\,.\,1{,}15\,.\,2{,}70\,.\,10^{6}\left(1+\frac{0{,}06}{0{,}333}\right)(U_2-U_1)}{58\,.\,10^{8}[U_1+U_2-1{,}25(i_1+i_2)]}=$$

$$=\frac{0{,}555(U_2-U_1)}{U_1+U_2-1{,}25(i_1+i_2)}\,. \qquad \text{(C)}$$

Для расчёта составляем таблицу 3, вписав в неё токи возбуждения в пределах от 17,5 до 77,5 *а* и соответствующие им напряжения возбудителя в пределах от 50 до 98 *вольт* (по внешней нагрузочной характеристике). Ступени тока следовало бы принять по 2—2,5 *а*, но мы для сокращения размеров примерной таблицы 3 примем их по 5 *ампер*.

Для второй строки по формуле (C) получаем:

$$\Delta t=\frac{0{,}555(56-50)}{50+56-1{,}25(17{,}5+22{,}5)}=0{,}0595 \text{ сек. } t=$$

$$=\Delta t=0{,}0595 \text{ сек.}$$

Для третьей строки находим:

$$\Delta t=\frac{0{,}555(61-56)}{56+61-1{,}25(22{,}5+27{,}5)}=0{,}051;\ t=0{,}0595+$$

$$+0{,}051=0{,}110 \text{ сек.}$$

Для четвертой строки получаем:

$$\Delta t=\frac{0{,}555(66-61)}{61+66-1{,}25(27{,}5+32{,}5)}=0{,}0533\ сек.\quad t=0{,}110+$$
$$+0{,}0533=0{,}163\ сек.$$

Таблица 3

i	$\dot{U}$	Δt	t
17,5	50	—	0
22,5	56	0,0595	0.0595
27,5	61	0,051	0,110
32,5	66	0,0533	0,163
37,5	70		
42,5	74		
47,5	78		
52,5	81,5		
57,5	84,5		
62,5	88		
67,5	91,5		
72,5	95		
77,5	98		
. . .	. . .	. . .	. . .
. . .	. . .	. . .	. . .
80	100	∞	∞

Закончив таблицу, строим по ней кривые $i=\varphi(t)$ и $U=\varphi(t)$. Спрямляя кривую $U=\varphi(t)$ на отрезке времени $\Delta t=0{,}5$ *сек.*, находим по ГОСТ—183-41 скорость подъема напряжения при форсировке возбуждения в *вольтах* в секунду и в номиналах в секунду.

Приведенных трех примеров достаточно для того, чтобы на основе их рассчитать все остальные рассмотренные ранее процессы возбуждения возбудителя.

Использованная литература

[1] **А. Е. Алексеев** — Конструкция электрических машин. 1949 г.

[2] **А. Е. Алексеев** — Методика курсового проектирования электрических машин. 1940 г.

[3] **М. П. Костенко** — Электрические машины. Общая часть. 1944 г.

[4] **М. П. Костенко** — Электрические машины. Специальная часть, 1949 г.

[5] **М. Лившиц** — Электрические машины, том II и III, изд. 1935. и 1936.

[6] **Г. А. Люст** — Расчет синхронных генераторов. 1934.

[7] **Г. Н. Петров** — Электрические машины. 1945.

[8] **В. И. Сысоев** — Расчет синхронных машин. 1940.

[9] Заводские расчеты синхронных машин. Под редакцией **В. А. Толвинского** и **Р. А. Лютера**. Изд. БТИ завода „Электросила", 1947.

[10] Обмотки электрических машин. Авторский коллектив инженеров завода „Электросила", 1937.

[11] Гидрогенераторы. Технический справочник завода „Электросила" 1935.

[12] **В. Т. Касьянов** — О составлении схем, петлевых и волновых обмоток трехфазного тока. Технический отчет. Изд. БТИ завода „Электросила", 1946.

[13] **В. Т. Касьянов** — Составление схем петлевых и волновых обмоток трехфазного тока. Сборник „Электросила", 1949 г. № 6.

[14] **З. Б. Нейман** и **К. Ф. Костин** — Серия вертикальных гидрогенераторов завода „Уралэлектроаппарат", ВЭП, 1949, № 3.

[15] **М. Н. Грузов, К. Ф. Костин** и **З. Б. Нейман** — Гидрогенераторы вертикального исполнения малых мощностей. ВЭП, 1950, № 2.

[16] **В. Т. Касьянов** — Диаграмма синхронной машины. Эл-во 1933 № 11.

[17] СЭТ, том У — Синхронные машины.

[18] M. Walker — Diagnosing of Troubles in Electrical Machines. 1921.

[19] Große Wasserkraftgeneratoren BBC Mitteilungen 1949 № 6—7.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора

Обоснования и примеры расчета явнополюсных синхронных машин

Типография ВМАКВ имени А. Н. Крылова

Поступ. в произв. 11.IX.50 г. Зак. 858. Подп. к печ. 21.II.51 г.

Автор. 9,5 л. Печатн. 10 л. ГМ—201153

